



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE UM REATOR DE PIRÓLISE
UTILIZANDO RESÍDUO COMO FONTE DE ENERGIA**

Filipe dos Santos Turatti

Lajeado, junho de 2020.

Filipe dos Santos Turatti

AVALIAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE UM REATOR DE PIRÓLISE UTILIZANDO RESÍDUO COMO FONTE DE ENERGIA

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – etapa II, na linha de formação específica em Engenharia Mecânica, na Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Mont. Odorico Konrad

Lajeado, junho de 2020.

Filipe dos Santos Turatti

AVALIAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE UM REATOR DE PIRÓLISE UTILIZANDO RESÍDUO COMO FONTE DE ENERGIA

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – etapa II, do curso de graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica:

Prof. Dr. Mont. Odorico Konrad - Orientador
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Me. Carlos Henrique Lagemann
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof^a. Dra. Sônia Elisa Marchi Gonzatti
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Lajeado, junho de 2020.

AGRADECIMENTOS

Quando um sonho está próximo de ser realizado, mesmo que depois de muitos km percorridos, noites sem dormir, aflições em períodos e durante as provas, se percebe o quanto tudo vale a pena; e ainda conseguir conquistar tantos amigos e profissionais que durante essa jornada me fizeram crescer pessoal e profissionalmente.

Um sonho que é a conquista de uma graduação, que para mim sempre pareceu distante pelas oportunidades que a vida tinha me oferecido, mas foi com bastante esforço, dedicação e sobretudo empenho, e ao FIES, conciliando trabalho, estudo e distância da Universidade, que fazem dessa conquista ainda mais saborosa.

Este sonho é uma realização pessoal construída de forma coletiva, que dedico a minha família, minha mãe Sandra, meu irmão Vitor, meu padrasto Gilson, que sempre me deram forças e sobretudo incentivo moral para que isso se tornasse realidade, e meu avô Antônio, que mesmo ausente neste momento foi sempre um exemplo para mim.

Minha namorada Isadora, pelo incentivo, paciência, carinho e dedicação para que isso se tornasse realidade.

Aos amigos e empresários Jader Kilpp e Fernando Formentini que doaram seu tempo e experiência para tornar esse trabalho conclusivo.

Aos meus colegas e profissionais da empresa FASA, que me fizeram crescer com seus conhecimentos.

À empresa Sistemilk, pela confiança e oportunidade e sobretudo entendimento da dificuldade da realização deste trabalho no período que mais precisei.

Ao meu orientador, professor Odorico Konrad, que cumpriu a sua função de orientar, acalmar, cobrar, pela paciência e disposição em todos os momentos de dúvida. Muito obrigado!

Aos meus amigos que estiveram próximos neste período, todos eles foram essenciais para que a construção dessa formação pudesse ser concluída.

“Aquele que não luta pelo futuro que quer, deve aceitar o futuro que vier” (autor desconhecido).

RESUMO

Neste trabalho foi estudado um protótipo de reator de pirólise através de uma avaliação do potencial energético gerado por diferentes resíduos de ambiente doméstico e industrial, sendo este último, o resíduo sólido de couro *wet blue*. Para uma melhor verificação das análises, foi realizada uma triagem dos resíduos coletados do ambiente doméstico, a fim de retirar o resíduo orgânico e utilizar o restante, assim como uma triagem do tamanho dos resíduos a serem utilizados, tanto doméstico quanto industrial, mantendo uma quantidade menor de matéria. Essa padronização é necessária para que a análise se torne mais eficiente e rápida, já que se trata de um reator de pirólise de escala de bancada. Para dimensionamento dos componentes e melhor detalhamento para fabricação, o reator foi desenvolvido através de um protótipo em software 3D. Para que o protótipo fosse mais eficiente, aproximando-se da escala real, foi projetado com o cilindro principal do reator, em modo rotatório, agitando a massa, de modo que o resíduo se tornasse mais homogêneo e a transferência de calor mais eficiente. O princípio do mecanismo do reator é a decomposição física e química por meio da ação de carga térmica e ausência de oxigênio, em que a temperatura varia de 300 a 1000 °C no processo. Ao final da pesquisa, concluiu-se que o balanço energético se deu negativo, uma vez que a injeção de energia ao processo foi maior que as energias resultantes dos subprodutos gerados, o que pode ser caracterizado através da análise elementar. Calculados o poder calorífico resultante da pirólise dos resíduos, obteve-se 1252,01 kcal de perda energética no processamento do resíduo sólido urbano e 1324,49 kcal de perda energética no resíduo sólido industrial. Com o desenvolvimento do protótipo, puderam ser identificadas variáveis que devem ser consideradas, para a obtenção de melhores resultados no que tange ao melhor aproveitamento do processo, de modo a reduzir perdas durante o processamento, promover o reaproveitamento dos gases para aquecimento do sistema e evitar pontos de vazamento dos mesmos.

Palavras-chave: Pirólise. Resíduo sólido urbano. Resíduo sólido industrial. Aproveitamento energético.

ABSTRACT

In this work, a prototype of a pyrolysis reactor was studied through an evaluation of the energy potential generated by different residues from the domestic and industrial environment, the latter being the solid wet blue leather residue. For a better verification of the analyzes, a sorting of the residues collected from the domestic environment was carried out, in order to remove the organic residue and use the rest, as well as a sorting of the size of the residues to be used, both domestic and industrial, maintaining a quantity minor of matter. This standardization is necessary for the analysis to become more efficient and quicker, since it is a bench scale pyrolysis reactor. For dimensioning the components and better detailing for manufacturing, the reactor was developed through a prototype in 3D software. In order for the prototype to be more efficient, approaching the real scale, it was designed with the main cylinder of the reactor, in rotary mode, stirring the mass, so that the residue became more homogeneous and the heat transfer more efficient. The principle of the reactor mechanism is physical and chemical decomposition through the action of thermal load and absence of oxygen, in which the temperature varies from 300 to 1000 ° C in the process. At the end of the research, it was concluded that the energy balance was negative, since the injection of energy into the process was greater than the energy resulting from the generated by-products, which can be characterized through elementary analysis. Calculated the calorific power resulting from the pyrolysis of the residues, 1252.01 kcal of energy loss was obtained in the processing of urban solid waste and 1324.49 kcal of energy loss in the industrial solid waste. With the development of the prototype, variables could be identified that should be considered, in order to obtain better results in terms of better use of the process, in order to reduce losses during processing, promote the reuse of gases for heating the system and avoid leakage points.

Keywords: Pyrolysis. Urban solid waste. Industrial solid waste. Energy utilization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa indicativo da extensão do lixo no Oceano Pacífico	22
Figura 2 - Divisão quanto à origem dos resíduos sólidos	25
Figura 3 - Exportações brasileiras de couro bovino (% área/m ²) e origens das exportações de couros e peles.....	30
Figura 4 - Couro <i>wet blue</i> após curtimento	31
Figura 5 - Rebaixadeira de couro <i>wet blue</i> e serragem/aparas.....	32
Figura 6 - Geração Elétrica (GWh) de acordo com a fonte e o ano	33
Figura 7 - Localização das usinas de geração de energia por biomassa no RS	34
Figura 8 - Fontes de biomassa	35
Figura 9 - Pirólise em uma partícula de biomassa	37
Figura 10 - Reações da pirólise e seus produtos	38
Figura 11 - Bio-óleo produzido através do processo de pirólise em laboratório	41
Figura 12 - Principais formas de utilização do gás de síntese.....	42
Figura 13 - Pyro-6F: máquina de pirólise, atualmente fabricadas e vendidas pela empresa Green Charcoal Internacional, para produzir bio carvão	44
Figura 14 - <i>Biochar</i> produzido em ensaio.....	45
Figura 15 - Protótipo Reator Pirólise Rotativa	50
Figura 16 - Fluxograma Processo RSU.....	53
Figura 17 - Fluxograma Processo RSI	54
Figura 18 - Equipamento CHNS/O Analyzer 2400 Series II	55
Figura 19 - Equipamento Cromatógrafo Gasoso.....	56
Figura 20 - Componentes do Cilindro do leito e tubulação de saída dos gases: A) Desenhos das furações, posições, diâmetros e espessura de cada peça e chapa; B)	

Corte plasma; C) Corte e solda do cilindro do leito; D) Flanges do cilindro parafusados; E) Flange e tampa de saída dos gases, usinados; F) Tubo coletor de óleo e gás	59
Figura 21 - Conjunto do sistema de aquecimento do reator.....	61
Figura 22 - Vedação da tubulação de controle de chama	62
Figura 23 - Motorreductor para acionamento do leito	63
Figura 24 - Fixação do motorreductor na cabine do protótipo.....	63
Figura 25 - Termômetro infravermelho Tomate.....	64
Figura 26 - Balança de precisão.....	65
Figura 27 - Vazamento de gás no ensaio preliminar	65
Figura 28 - Diagrama para procedimento do processo experimental de pirólise	66
Figura 29 - Amostra de RSU - Polímeros.....	67
Figura 30 - Amostragem RSU para processo.....	67
Figura 31 - Armazenagem RSU para processo.....	68
Figura 32 - Acoplamento da junta de vedação de papelão de alta temperatura	68
Figura 33 - Coleta da massa antes e depois do processamento RSU. A) Massa do botijão antes do processo; B) Massa do botijão após o processo.....	69
Figura 34 - Análise e coleta de temperatura	70
Figura 35 - Análise e verificação de óleo e gás. A) 35 minutos de processamento; B) 1 h de processamento.....	70
Figura 36 - Resultado de líquido (bio-óleo) - RSU.....	71
Figura 37 - Coleta do carvão após processamento do RSU	71
Figura 38 - Resultado de massa e volume do carvão (<i>biochar</i>) - RSU	72
Figura 39 - Amostra de RSI - Couro <i>wet blue</i>	73
Figura 40 - Amostragem RSI - Couro <i>wet blue</i> para processo.....	73
Figura 41 - Armazenagem do RSI - Couro <i>wet blue</i> para processo	74
Figura 42 - Coleta da massa antes e depois do processamento RSI. A) Massa do botijão antes do processo; B) Massa do botijão após o processo.....	75
Figura 43 - Análise e coleta de temperatura - Pirólise RSI.....	75
Figura 44 - Análise e verificação de óleo e gás.....	76
Figura 45 - Quantidade resultante de bio-óleo - RSI.....	77
Figura 46 - Coleta do carvão após processamento do RSI – Couro <i>wet blue</i>	77
Figura 47 - Resultado de massa e volume do carvão (<i>biochar</i>) - RSI.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de empresas inventariadas por setor industrial	29
Tabela 2 - Características do Cromatógrafo Gasoso	56
Tabela 3 - Componentes do Cilindro do leito e tubulação de saída dos gases	57
Tabela 4 - Componentes do sistema de aquecimento do reator	60
Tabela 5 - Resultado da variação de massa e volume carvão (<i>biochar</i>)	80
Tabela 6 - Resultado da análise cromatográfica de gases	81
Tabela 7 - Resultado da análise elementar	82
Tabela 8 - Resultado poder calorífico superior	82
Tabela 9 - Resultado poder calorífico superior multiplicado pela massa	83
Tabela 10 - Resultado da conversão do poder calorífico em energia	83

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABAL:	Associação Brasileira de Alumínio
ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE:	Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANEEL:	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP:	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
C:	Carbono
CICB:	Centro das Indústrias de Curtumes do Brasil
CPETS:	Centro de Pesquisa em Energias e Tecnologias Sustentáveis
EfW:	Energia do lixo
FEPAM:	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler
GLP:	Gás liquefeito de petróleo
GWh:	Gigawatt-hora
H:	Hidrogênio
kg:	Quilograma
kPa:	Quilopascal
mg:	Miligrama
MJ/kg:	Megajoule por quilograma
MW:	Megawatt
O:	Oxigênio
O ₂ :	Gás Oxigênio
ONU:	Organização das Nações Unidas
PERS/RS:	Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul

PNRS:	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RPM:	Rotação por minuto
RSI:	Resíduo Sólido Industrial
RSU:	Resíduo Sólido Urbano
SINIR:	Sistema de informações sobre a gestão dos resíduos sólidos
ton:	Tonelada
WtE:	Desperdício de energia
Ø:	Diâmetro
§:	Parágrafo
°C:	Grau Celsius
°F:	Grau Fahrenheit

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Tema.....	18
1.2 Problema.....	18
1.3 Objetivo.....	19
1.3.1 Objetivo geral.....	19
1.3.2 Objetivos específicos.....	19
1.4 Resultados esperados.....	19
1.5 Justificativa	19
1.6 Delimitação do tema	20
2 REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 Política Nacional de Resíduo Sólido (PNRS).....	21
2.2 Conceito de Resíduo Sólido Urbano.....	24
2.3 Conceito de Resíduo Sólido Industrial	28
2.4 Fontes de energia	33
2.5 Pirólise.....	36
2.5.1 Vantagem.....	39
2.5.2 Desvantagem	39
2.6 Bio-óleo.....	40
2.7 Syngas	41
2.8 Biochar.....	43
2.9 Transferência de calor.....	45
3 METODOLOGIA	48

3.1 Desenvolvimento do Protótipo	49
3.2 Avaliação do protótipo com diferentes resíduos	51
3.2.1 Resíduo de um centro de triagem de um município do Vale do Taquari.....	52
3.2.2 Resíduo de curtume	53
3.3 Realização dos experimentos	54
3.3.1 Análise do Carvão e Óleo.....	54
3.3.2 Análise do Gás	55
 4 DESENVOLVIMENTO	 57
4.1 Cilindro do leito, tubulação de saída dos gases	57
4.2 Aquecimento do cilindro do leito	60
4.3 Acionamento do cilindro do leito	62
4.4 Componentes para verificação do experimento	64
4.4.1 Verificação de temperatura.....	64
4.4.2 Verificação de peso	64
4.5 Ensaios preliminares	65
4.6 Ensaio do processo de RSU	66
4.6.1 Coleta e separação do resíduo RSU	66
4.6.2 Procedimento para processo RSU	67
4.6.3 Coleta de dados sobre energia de injeção do sistema.....	69
4.6.4 Processamento do RSU	69
4.7 Ensaio do processo de RSI – Couro <i>wet blue</i>	72
4.7.1 Coleta e separação do resíduo RSI – Couro <i>wet blue</i>	72
4.7.2 Procedimento para processo RSI – Couro <i>wet blue</i>	73
4.7.3 Coleta de dados sobre energia de injeção do sistema.....	74
4.7.4 Processamento do RSI - Couro <i>wet blue</i>	75
 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	 79
5.1 Caracterização do carvão (<i>biochar</i>)	79
5.2 Caracterização do óleo (bio-óleo)	80
5.3 Caracterização do gás (<i>syngas</i>)	81
5.4 Análise Elementar	81
5.5 Potencial energético	82
5.6 Reator de Pirólise	84

6 CONCLUSÃO	85
REFERÊNCIAS.....	87
ANEXOS	96

1 INTRODUÇÃO

No contexto da sociedade atual o consumo é constante e exponencial, e através desse aumento com relação a tempos passados, surgiu um grande problema: a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). O desafio se torna buscar alternativas para resolver as consequências dessa problemática moderna. Muitas vezes o termo utilizado para esses resíduos é o “lixo”. Etimologicamente essa palavra, de apenas 4 letras, deriva do termo em latim *lix* que significa cinzas, no dicionário de língua portuguesa *Michaelis* (2019) “são resíduos provenientes de atividades domésticas, industriais, comerciais, etc. que não servem e são jogadas fora”. Atualmente, devido ao complexo e difícil enquadramento deste termo, nos meios jurídicos e acadêmicos ele vem sendo substituído pelo termo “resíduo”.

Independente das diversas definições, o ato de definir algo como “lixo/resíduo” deveria ser precedido da pergunta: o que estou descartando é de fato lixo ou apenas deixou de ter valor para meu uso e para aquilo que desejei alcançar? Um exemplo claro disso trata da latinha de alumínio das bebidas, que após a ingestão do líquido o recipiente é facilmente descartado pelo consumidor. Entretanto, a probabilidade dessa lata ser coletada e encaminhada para uma recicladora é de 97,3 %, conforme índice de reciclagem de latas de alumínio no ano de 2017 da Associação Brasileira de Alumínio (ABAL).

Infelizmente, os números consideráveis envolvendo a reciclagem do alumínio não se repetem com a maioria dos rejeitos descartados pela população; pelo contrário, o número de RSU somente aumenta. No ano de 2017, de acordo com a Associação

Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), foram produzidos 214.868 toneladas por dia de resíduos, 7 milhões de toneladas não foram coletadas/descartadas adequadamente, o que equivale a 6.100 piscinas olímpicas, e quase 19 toneladas sequer foram coletadas.

A preocupação com esse tema resulta em diversas ações e estratégias não só para a redução na fonte, mas também para o reaproveitamento de materiais de quaisquer que sejam os resíduos gerados, além daqueles que não conseguem ser reutilizados ou reciclados – rejeitos. Devido a esse problema, o Brasil realizou a elaboração da lei 12.305/10, denominada Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que cria princípios, objetivos e instrumentos, bem como diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos. A PNRS define uma escala de prioridades em relação aos resíduos: não geração, redução, reutilização, tratamento dos resíduos e disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

Além do crescente aumento da produção de resíduos sólidos, se tem também o aumento da demanda de energia proveniente do desenvolvimento tecnológico, aumento populacional e de atividades industriais, ou seja, alternativas para fontes de energia também se tornam um assunto de importante discussão. A soma destes fatores nos faz perceber os resíduos como passíveis de conversão em energia útil, através de tantas tecnologias capazes de aproveitar fontes energéticas diferenciadas.

A biomassa, por exemplo, se apresenta como a quarta fonte de energia mais utilizada no mundo e com alta capacidade produtiva (FERREIRA, 2014), assim, processos como a combustão, gaseificação e a pirólise tem sido desenvolvidos ao longo dos anos e são as principais formas de se converter resíduos em energia (ALMEIDA, 2008). Considerando seu amplo potencial, o presente estudo busca analisar alternativas de destinação final dos resíduos sólidos voltadas para o aproveitamento energético.

Este trabalho faz um estudo utilizando compostos de resíduos domésticos e industriais (couro *wet blue*) resultantes de processos, e coletados através de um centro de triagem de um município do Vale do Taquari, realizando a sua conversão

em fonte de energia, através da obtenção de bio-óleo, *biochar*¹ e *syngas*². O processo se dá através de um reator de pirólise no qual é realizada a decomposição térmica em temperaturas que variam de 300 a 1000 °C, em atmosfera inerte, evitando assim que ocorra a combustão. Os principais produtos obtidos nesse processo são sólido (*biochar*), líquido (bio-óleo) e gás (*syngas*), elevando rendimentos devido a facilidade de armazenamento e transporte (BRIDGWATER, 2012).

1.1 Tema

Inicialmente o tema é trazido através de conceitos e dos objetivos gerais e específicos do presente trabalho. Em seguida trata-se da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que contém instrumentos importantes para o avanço do país em questões ambientais, especialmente sobre os conceitos de resíduos sólidos urbanos e resíduos sólidos industriais, traçando um panorama atual da geração de resíduos. Trata também dos conceitos de pirólise, fontes de energia, bio-óleo, *syngas* e *biochar*, onde se procura mostrar os aspectos do processo e as principais formas de execução do seu aproveitamento energético.

Assim sendo o tema deste trabalho busca desenvolver um reator de pirólise em escala de bancada, para estudo e avaliação do potencial energético de diferentes resíduos, coletados em meio residencial e industrial.

1.2 Problema

A constante demanda do recolhimento dos resíduos gerados nas cidades e também em indústrias, acarreta uma análise do quanto e como se está gerindo o próprio resíduo e o que se faz para minimizá-lo, além do que se reaproveita deles levando em consideração os meios e tecnologias disponíveis. Com isso, torna-se importante analisar um protótipo de reator de pirólise com foco na sua eficiência e nas dos subprodutos gerados pelos resíduos utilizados, a fim de avaliar sua geração de energia.

¹ Fração sólida resultante do processo de pirólise.

² Fração gasosa resultante do processo de pirólise.

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo da presente monografia é realizar um protótipo de reator de pirólise para análise de diferentes resíduos como fonte de energia, com análises de poder calorífico e balanço energético, aplicando no projeto os conceitos de transferência de calor e massa e mecânica dos fluídos aprendidos ao longo da graduação.

1.3.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, a pesquisa pretende:

- a) Desenvolver um protótipo de reator de pirólise em escala de bancada;
- b) Avaliar os diferentes tipos de resíduos no protótipo confeccionado;
- c) Avaliar o potencial energético do subproduto gerado pela pirólise.

1.4 Resultados esperados

Poder atribuir resultados através dos subprodutos gerados no processo do reator de pirólise, verificando os seus potenciais energéticos e possibilitando a validação do sistema como eficiente quanto ao "consumo energético de trabalho *versus* produção energética do resultado do trabalho".

1.5 Justificativa

A principal justificativa deste trabalho é a elaboração de um projeto que agregue conhecimento e possibilite criar, adequar ou melhorar um sistema com condições mais adequadas ao nosso meio. Com o pensamento global, verificando os principais problemas e maiores desafios na atualidade, observa-se que os resíduos sólidos urbanos e industriais são cada vez mais frequentes em nosso dia a dia, muito pelo nosso consumo excessivo, mas também pela falta de conscientização e falta de políticas públicas de efetividade nos resultados, embora que muito já se tenha avançado desde a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

A proposta da avaliação do protótipo do reator de pirólise vem com o objetivo de verificar o potencial energético gerado a partir dos resíduos sólidos urbanos e industriais (couro *wet blue*), para que seja visto como uma alternativa aos municípios e tendo como base os princípios da Lei 12.305/10.

Assim, neste trabalho é desenvolvido um reator de pirólise em escala de bancada para a realização de experimentos de pirólise com resíduos e obtenção de bio-óleo, *biochar* e *syngas*.

1.6 Delimitação do tema

O presente trabalho visa a realização de um protótipo de reator de pirólise para análises de diferentes tipos de resíduos como fonte de calor, com análise do poder calorífico e posteriormente a verificação do balanço energético, não será considerado como injeção de energia do sistema o motorreductor para o acionamento rotatório do cilindro.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Política Nacional de Resíduo Sólido (PNRS)

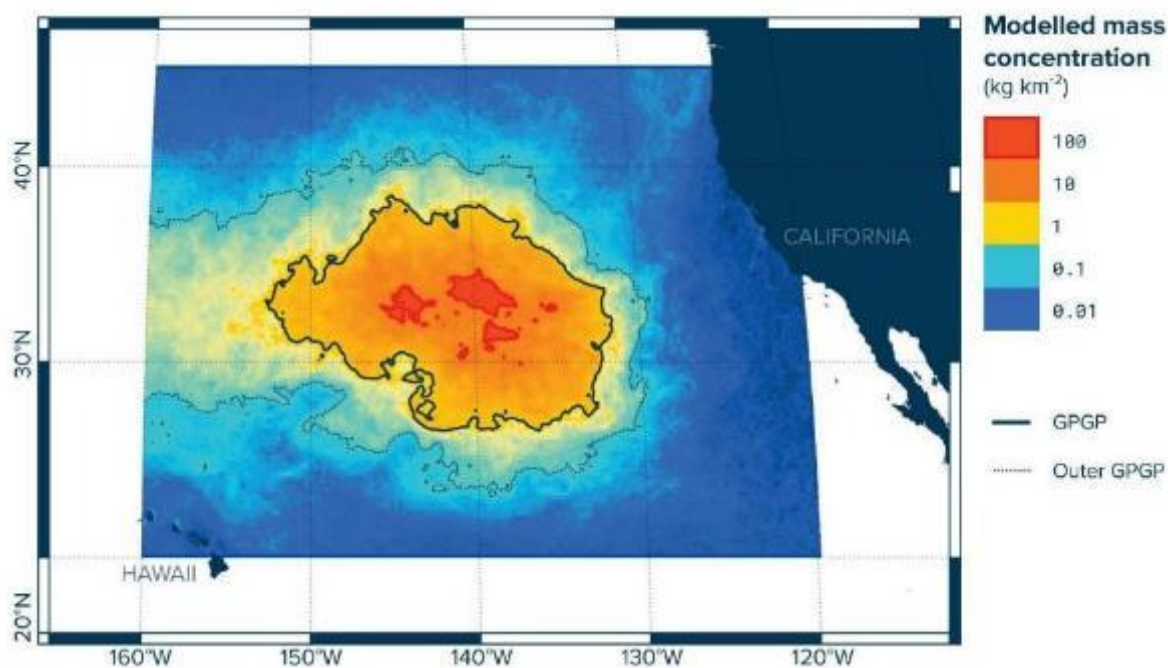
O desenfreado consumo de produtos não-duráveis e/ou descartáveis que a sociedade moderna trouxe com seu desenvolvimento, acelerou na mesma proporção a problemática sobre o gerenciamento de resíduos sólidos. De acordo com Lemos (2011), o ser humano, aliado à inovação tecnológica, gera quantidades crescentes de resíduos cada vez mais complexos, e cada vez menos existem locais adequados para descarte ou até mesmo seu reaproveitamento.

O Programa Ambiental das Nações Unidas divulgou que existem “46 mil fragmentos de plástico em cada 2,5 quilômetros quadrados da superfície dos oceanos. Isso significa que este resíduo já responde por 70 % da poluição marinha por resíduos sólidos” (NEIVA; LIMA, 2008, p. 93).

No Oceano Pacífico, esta situação é alarmante devido às características físicas do plástico, que lhe permite grande durabilidade aliado à dinâmica das correntes marinhas, o que acabou dando origem ao “primeiro continente artificial da história, um vasto território de 100 milhões de toneladas de refugos” (WALDMAN, 2010, p. 60). Esta área ficou conhecida como “Grande Vórtice de Lixo do Pacífico”, ou simplesmente “lixão do Pacífico” e situa-se entre a Califórnia e o Havaí (Figura 1). Sua extensão é calculada em 15 milhões de km², aproximadamente três vezes o tamanho da França; suas condições e características permitem que as correntes marítimas

formem esse grande círculo de resíduo. No entanto, esta não é a única, mas somente a maior dentre tantas outras áreas espalhadas pelos oceanos (VAIANO, 2018).

Figura 1 - Mapa indicativo da extensão do lixo no Oceano Pacífico



Fonte: Divulgação/The Ocean Cleanup (2020).

Pode-se dizer que o intuito do presente trabalho é justamente adentrar esta discussão sobre a importância, e sobretudo, necessidade, de buscar alternativas para grande parcela do RSU que não pode ser reutilizada ou reciclada, utilizando e/ou buscando alternativas ambientalmente corretas (LEMOS, 2011).

A definição de lixo ou resíduo é diversificada, porém, destaca-se a da Organização das Nações Unidas (ONU), que por meio do documento Agenda 21 define o lixo ou resíduo da seguinte forma:

Os resíduos sólidos compreendem todos os restos domésticos e resíduos não perigosos, tais como os resíduos comerciais e institucionais, o lixo da rua e os entulhos de construção. Em alguns países, o sistema de gestão dos resíduos sólidos também se ocupa dos resíduos humanos, tais como excrementos, cinzas de incineradores, sedimentos de fossas sépticas e de instalações de tratamento de esgoto. Se manifestarem características perigosas, esses resíduos devem ser tratados como resíduos perigosos (Cap. 21, p. 598).

Já no Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que se tornou indispensável quando se fala desse assunto, contém objetivos, diretrizes e

instrumentos “à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis” (Brasil, 2010). Trata-se de uma lei bastante atual e que combate os principais problemas sociais e ambientais relativos ao manejo inadequado de resíduos sólidos.

A legislação foi um marco neste campo por tratar de todos os resíduos sólidos domésticos, industriais, entre outros (materiais recicláveis ou que podem ser reaproveitados) e também por tratar sobre os rejeitos (itens que não podem ser reaproveitados), incentivando seu descarte correto e o compartilhamento de responsabilidade pelo ciclo de vida dos produtos integrando o poder público, a iniciativa privada e o cidadão (Brasil, 2010).

A lei conceitua resíduos sólidos como:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviável em face da melhor tecnologia disponível. (Art. 3º, inciso XVI).

E como rejeito, traz o conceito de “resíduos sólidos que, esgotadas todas as possibilidades de recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada” (Art. 3º, inciso XV).

Além disso traz outras ferramentas, como a Logística Reversa, que traz diversas ações para viabilizar a coleta e a restituição de resíduos sólidos ao setor empresarial; a Coleta Seletiva, resíduos sólidos previamente segregados conforme constituição e composição; Sistema de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR), com o objetivo de armazenar, tratar e fornecer informações que apoiem as funções ou processos de uma organização, entre outros.

Uma das medidas mais importantes aprovadas determina que todo e qualquer município terá a obrigação legal de destinar e dispor adequadamente seus resíduos. O artigo 3º inciso VII dispõe que:

A destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes [...] entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

Essa legislação foi regulamentada pelo Decreto 7.404/10 buscando a gestão integrada dos resíduos sólidos e reconhecendo-os como bens econômicos, quando reutilizáveis, recicláveis, tornando-os fonte de matéria prima para outros processos. Busca a extinção dos “lixões” propondo planejamentos de adequação a níveis nacional, estadual, interestadual, microrregional, intermunicipal metropolitano e municipal. Entretanto pelos dados apresentados pelo Panorama/2017 da ABRELPE o número de municípios que permanecem utilizando este tipo de disposição final é altíssimo, 1.610 em todo o país.

Percebe-se que, embora deficitário, setores público e privado estão em período de adequação e se movimentam no sentido de cumprir as exigências da PNRS. Uma das alternativas apresentadas é justamente o aproveitamento energético dos resíduos sólidos, que neste estudo se apresenta a partir do processo de um reator de pirólise (ABRELPE, 2017).

2.2 Conceito de Resíduo Sólido Urbano

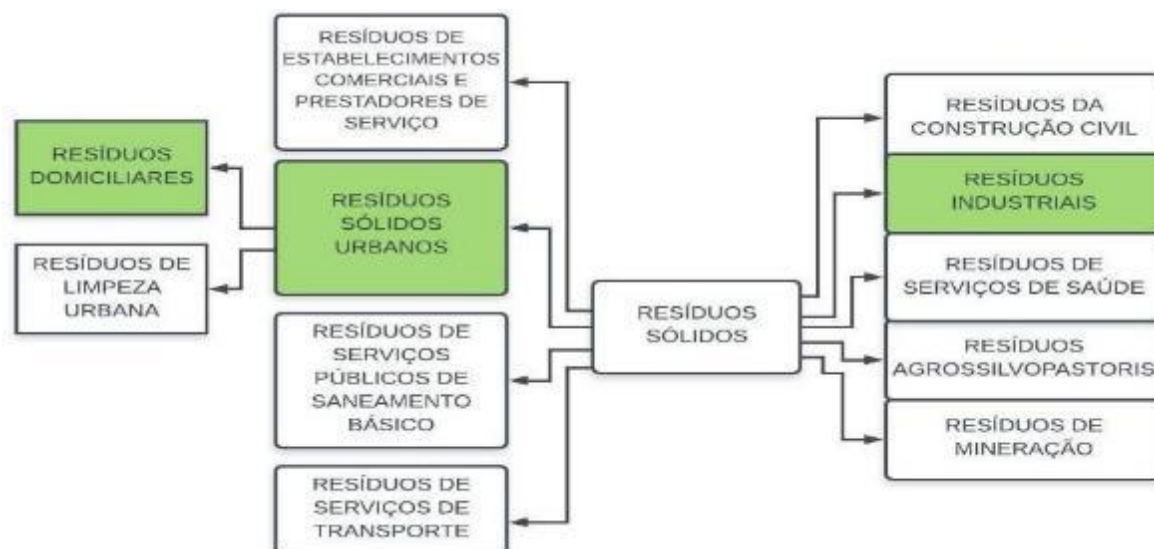
Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), assim denominados de acordo com a norma NBR 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), e popularmente chamados de lixo urbano, resultam da atividade doméstica e comercial nos centros urbanos. Este conceito engloba os resíduos domiciliares, originários de atividades domésticas em residências urbanas, e os resíduos de limpeza urbana, que são originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas, ambos de acordo com o PNRS (Figura 2).

Segundo Sharma et al. (1997) os resíduos sólidos urbanos podem ser divididos em três categorias:

- a) Matéria orgânica facilmente decomposta: restos de alimentos e similares;

- b) Matéria orgânica de difícil biodegradabilidade: madeiras, galhos verdes, papel e papelão não plastificado;
- c) Materiais inertes: plásticos, vidros, metais e outros sintéticos.

Figura 2 - Divisão quanto à origem dos resíduos sólidos



Fonte: Adaptado de Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei 12.305/10 (SCHALCH, 2012).

O aterro de resíduos sólidos urbanos é a saída universalmente preferida devido aos custos relativamente baixos, entretanto, possui limitações não só de soluções ambientalmente corretas como também limitações físicas e práticas como a disponibilidade de áreas próximas aos centros urbanos e que sejam suficientemente grandes para o uso almejado. Essas limitações também trazem consequências como a diminuição de áreas habitáveis, contaminação do solo e do lençol freático, emissão de gases de efeito estufa, diminuição da biomassa disponível e o desperdício de matéria prima reaproveitável (LIMA, 2004).

Para Pinto (2009) a evolução de resíduos urbanos é constante em termos qualitativos e mais ainda em termos quantitativos, já que a quantidade de resíduos bem como sua composição variam conforme muitos fatores: nível de renda familiar da população, industrialização de alimentos, hábitos da população e fatores sazonais. Assim também explica Fuscaldo (2001, p. 37):

A quantidade per capita de lixo produzido aumenta em proporção à renda familiar, já que maior renda propicia maior consumo e, conseqüentemente, mais desperdícios por sobras ou obsolescência e maior ocorrência de embalagens. Na composição do lixo das classes de mais alta renda observa-

se maior quantidade de papéis, embalagens de plástico e papelão, recipientes de vidro e metal e menor quantidade relativa de matéria orgânica (restos de comida). [...] O crescente movimento de industrialização dos alimentos também tem tendência para a maior quantidade de embalagens no lixo e menor quantidade de restos de comida já que os alimentos já vêm limpos e preparados para o consumo. [...] a tendência moderna para aquisição de bebidas em embalagens sem retorno (leite, seus derivados, cervejas, sucos, etc.) tem aumentado a participação de plásticos, latas e papelão no lixo.

Além disso, a era moderna atual é sintomática com relação a obsolescência programada – estratégia de mercado criada no século XX em que os produtos são fabricados propositalmente com ciclo de vida curto – o marketing altamente direcionado para o consumo, induzindo as pessoas a sempre descartar o que possuem e procurar a versão mais atual. Essa maneira de pensar propriamente capitalista domina em escala global e conseqüentemente causa um volume cada vez maior de resíduos (LIMA, 2007).

Rosa (2007) cita um estudo coordenado pelo professor Ruediger Kuehr da Universidade das Nações Unidas que revela que 1,8 tonelada dos mais diversos tipos de materiais são utilizados para se construir um único computador *desktop*, com 1 vez o seu próprio peso de combustíveis fósseis, o que se aproxima dos 240 kg, além de 22 kg de produtos químicos e 1.500 kg de água.

Além do uso de diversos materiais para se construir tudo que a sociedade consumista precisa, o seu descarte quando se torna indesejado também se torna um problema, tanto pela falta de espaço quanto pelo cumprimento de leis cada vez mais rígidas relacionadas ao meio ambiente. Dessa forma, é preciso buscar tecnologias que reaproveitem estes resíduos e utilizem seu potencial como matéria prima, visando uma proposta que promova o bem social e ambiental, como é o caso do potencial energético (WALDMAN, 2010).

No mundo, são gerados a cada ano uma grande quantidade de RSU: cerca de 246 milhões de toneladas nos EUA, 28 milhões de toneladas no Reino Unido e 40 milhões de toneladas no Japão, por isso, o Banco Mundial espera que a geração mundial de RSU atinja 2,2 bilhões de toneladas até 2025. A estimativa atual de geração de RSU é de 1,3 bilhão de toneladas por ano (BERNARDI, 2014).

A destinação correta para o RSU consiste na separação entre os resíduos orgânicos (para a pirólise ou compostagem) e os recicláveis (reciclagem de material ou energética). A reciclagem de material diz respeito ao uso do resíduo para produzir novos materiais, já a reciclagem energética se trata de usar o material reciclável como combustível e substituir outras fontes energéticas (GONÇALVES *et al*, 2013).

De acordo com a Política de Resíduos Sólidos, o aproveitamento energético é uma das formas de destinação final ambientalmente adequada para os resíduos sólidos urbanos, e para realizar esse procedimento têm-se, atualmente, as chamadas biorrefinarias, que de acordo com Demirbas (p. 79, 2009): “são instalações que integram processos e equipamentos para converter os resíduos em produtos de maior valor agregado, tais como combustíveis e outros insumos químicos”.

Ou seja, a utilização dos RSU nas biorrefinarias apresenta um grande potencial, que além de oferecer redução tanto no volume de resíduos destinados aos aterros, também possibilita a redução nas emissões de metano provenientes da decomposição anaeróbica dos materiais nesses locais (DEMIRBAS, 2009).

O processo de pirólise realizado com RSU, que será o objetivo deste trabalho, gera subprodutos que novamente podem voltar para a cadeia produtiva, destacando cinco deles (LIMA, 2007):

- a) Pó de carvão;
- b) Óleo vegetal, que pode ser utilizado para fabricação de biocombustível;
- c) Alcatrão;
- d) Lignina;
- e) Água ácida.

Com exceção do pó e carvão, os demais são líquidos presentes na massa vegetal e animal que ao ser volatizado, passam por um processo de destilação e retornam ao estado líquido para posteriormente serem encaminhados para comercialização na indústria química, cosmética, de abrasivos, entre outras. Nesse procedimento o vapor de água é o único item resultante que é liberado para a atmosfera (GONÇALVES *et al*, 2013).

De acordo com Downie (2010, p. 77): “A degradação termoquímica dos resíduos – pirólise – possui potencial para reduzir o volume final do material utilizado na alimentação do processo em até 90 %, com base no peso da tonelada úmida e apresentar produtos de interesse comercial”.

2.3 Conceito de Resíduo Sólido Industrial

Após a Revolução Industrial e a urbanização das cidades, as fábricas e indústrias passaram a ser o núcleo do novo organismo social, aumentando a infraestrutura de produtos duráveis e não duráveis. Além do consumo desenfreado, a produção e o descarte passam a ser uma preocupação, os chamados resíduos sólidos industriais gerados no processo produtivo e nas instalações industriais, variando conforme as características da especialidade (GOUVEIA, 2012).

De acordo com Bidone (2001), resíduo industrial é aquele produto descartado por estar fora das especificações ou que não tem aproveitamento interno na empresa/indústria e cada vez mais existe a cobrança com relação a necessidade de se demonstrar preocupação e compromisso com o seu descarte. Ocorre que, assim como outros setores de infraestrutura, o desenvolvimento socioeconômico não foi acompanhado pela implantação de empreendimentos de tratamento e destinação desses resíduos.

A NBR 10.004 classifica os resíduos em duas classes:

- a) Classe I (Perigosos): resíduos ou misturas de resíduos que possuem alguma característica de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou de patogenicidade, causando risco à saúde pública (morte, doença, efeitos adversos ao meio ambiente, etc.)
- b) Classe II (Não perigosos): São exemplos o resíduo de papel, papelão, materiais têxteis, madeira, entre outros. Essa classe é subdividida:
 - A. Inertes: resíduos que quando submetidos ao teste de solubilidade (norma NBR 10.006) não possuem nenhum constituinte solubilizado a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.
 - B. Não inertes: não se enquadram na Classe I e nem na Classe II A – inertes.

Neste contexto, os resíduos sólidos gerados na indústria do couro – os quais serão utilizados – podem ser classificados como Perigosos ou como Não Perigosos, por exemplo: resíduos perigosos são as aparas, serragem e pó de couro curtidos ao cromo também denominados de resíduos sólidos de couro *wet blue* e os efluentes desse tratamento (curtidos), já outros resíduos como carcaça e aparas de couro salgado são classificados como não perigosos pois não foram curtidos (MONTEIRO, 2013).

Em 2002 a FEPAM/RS (Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler) realizou o último estudo da área no Rio Grande do Sul, fazendo o levantamento de dados do Inventário Nacional de Resíduos Sólidos, com a intenção de classificar os tipos de empresas situadas no estado e a geração de resíduos envolvida. Na Tabela 1, retirada desse estudo verifica-se que 25,95 % das empresas, já naquela época, estavam concentradas no setor “couro”, constatando-se a consequente necessidade de controle a respeito de seus resíduos sólidos gerados.

Tabela 1 - Número de empresas inventariadas por setor industrial

SETOR INDUSTRIAL	EMPRESA INVENTARIADAS	PERCENTUAL DE EMPRESAS INVENTARIADAS
METALÚRGICO	537	31,46
COURO	443	25,95
MECÂNICO	416	24,37
QUÍMICO	230	13,47
TRANSPORTE	30	1,76
MINERAIS NÃO METÁLICOS	23	1,35
TÊXTIL	17	1
PAPEL E CELULOSE	7	0,41
LAVANDERIA INDUSTRIAL	4	0,23
TOTAL	1707	100

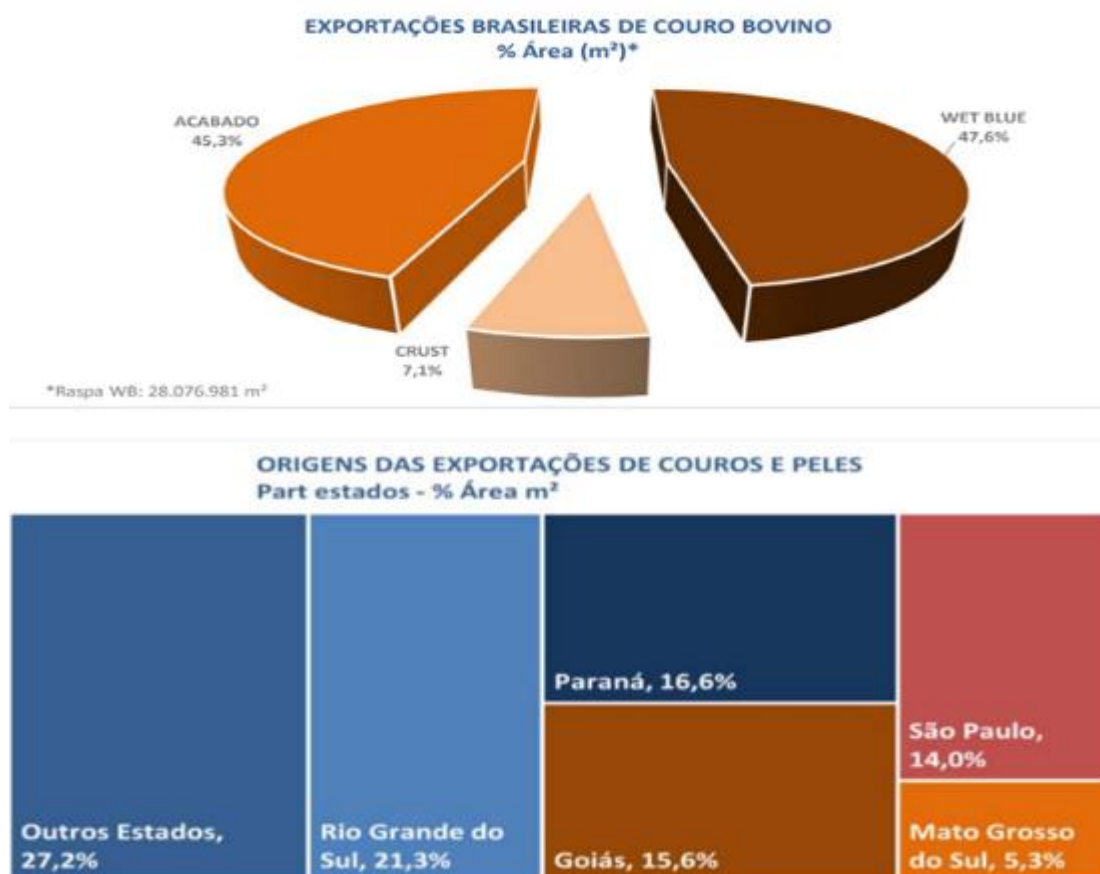
Fonte: Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais – Etapa RS (2002).

Apesar de, em 2015, no Plano Estadual de Resíduos Sólidos do RS, ter sido estipulada a elaboração imediata de um inventário dos resíduos sólidos industriais, a atualização desse levantamento ainda não ocorreu, mas ainda assim com os números

trazidos pela FEPAM se verifica a atual e recorrente necessidade da destinação correta dos resíduos gerados pela indústria curtumeira.

De qualquer forma, o Brasil destaca-se na agropecuária e detém o maior rebanho comercial bovino do mundo e é um dos cinco grandes produtores globais de couro, ou seja, os produtos derivados da agropecuária são de grande importância para o país (PACHECO; FERRARI, 2015). Segundo dados divulgados em setembro de 2019 pelo Centro das Indústrias e Curtumes do Brasil (CICB), o *wet blue* corresponde a 47,6 % da área de todo couro exportado, e o Rio Grande do Sul é responsável por produzir 21,3 % (Figura 3).

Figura 3 - Exportações brasileiras de couro bovino (% área/m²) e origens das exportações de couros e peles



Fonte: CICB (2019).

As indústrias curtumeiras transformam um material putrescível (pele animal, sem resistência) em material imputrescível de couro (estável e resistente), com

consumo de matérias-primas, energia e consequentemente com geração de contaminantes em fases gasosa, líquida e sólida. Em linhas gerais, o processamento de 1 tonelada de couro salgado ou *in natura* requer aproximadamente 500 kg de produtos químicos, de 15 a 25 m³ de água e de 2.600 a 11.700 kWh de energia, para produzir apenas 150 a 350 kg de couro acabado. (PACHECO; FERRARI, 2015).

O curtimento mais utilizado pelos curtumes é o curtimento mineral com sais e cromo, o que acaba por gerar resíduos perigosos, já que apenas 15 % dos reagentes químicos utilizados na fabricação do couro ficam retidos no produto final. A produção através das curtidas com cromo é denominada couro *wet blue* devido ao aspecto azulado ao final do processo (Figura 4) (OLIVEIRA, 2007).

Figura 4 - Couro *wet blue* após curtimento



Fonte: COBRASIL (2019).

De acordo com Moreira e Teixeira (2003), são produzidos diversos tipos de resíduos na fabricação do couro, mas considerando apenas a forma original da pele, os processos de sua transformação em couro e a apresentação final do produto, estima-se que 40 % da matéria-prima posta em operação no início do processo é jogada fora durante o curtimento do couro, seja nas águas residuais ou como resíduo sólido propriamente dito. Além disso, nas indústrias transformadoras do couro, como

fábricas de calçados, cerca de 20 % da superfície o couro é novamente descartado, ou seja, estima-se que no produto final se encontre apenas 27% de uma pele de um novilho, 73 % ficam perdidos sob a forma de resíduos.

Ainda de acordo com Moreira e Teixeira (2003), para cada unidade de pele bovina curtida ao cromo, são produzidos cerca de 4 kg de serragem de rebaixadeira (processo de correção da espessura), o que representa um elevado volume de resíduo e se torna um dos maiores problemas para a indústria do couro (Figura 5).

Figura 5 - Rebaixadeira de couro *wet blue* e serragem/aparas



Fonte: COBRASIL (2019).

O RSI utilizado neste trabalho – resíduo sólido do tratamento do couro – é previamente classificado como Perigoso (Classe I), devido à toxicidade dos agentes químicos utilizados, principalmente o cromo, e não pode ser considerado material homogêneo pois apresenta variações quanto à granulometria, de acordo com o curtimento utilizado (OLIVEIRA, 2007).

2.4 Fontes de energia

As fontes renováveis desempenham um papel fundamental no contexto mundial em que se encontra a sociedade. A biomassa, do ponto de vista energético, é todo recurso renovável gerado de matéria orgânica, tanto animal quanto vegetal, como plantas e óleos. Também podem surgir de alguns resíduos industriais como grãos, papel, madeira, bebidas e alimentos, assim como, de resíduos urbanos como o lodo de esgoto e o aterro sanitário (MIRANDA, 2009).

De acordo com o Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2008), a Terra acumula aproximadamente 1,8 trilhões de toneladas de biomassa, um dado relativamente grande, porém o potencial de aproveitamento de seu uso ainda é pouco explorado. Normalmente é associado com países em desenvolvimento e com problemas de desflorestamento e desertificação, porém, devido aos problemas ambientais atuais, esse assunto deixa de ser uma alternativa e passa a ser visto como uma obrigação (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

No Brasil a utilização da biomassa é cada vez mais crescente, de acordo com o Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2019), a geração elétrica através da biomassa aumentou 2,4 % de 2017 para 2018, como pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Geração Elétrica (GWh) de acordo com a fonte e o ano

BEN 2019 | Geração Elétrica¹ (GWh)

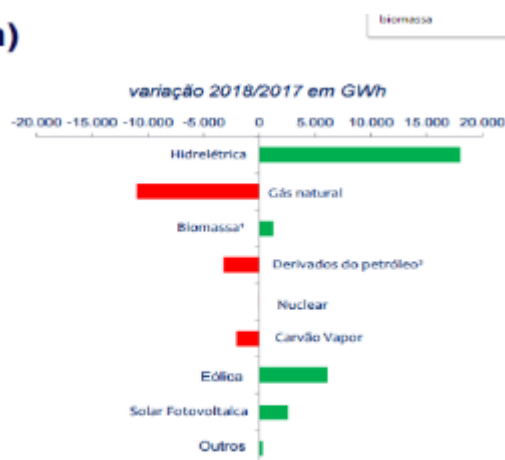
Fonte	2017	2018	Δ 18/17
Hidrelétrica	370.906	388.971	4,9%
Gás Natural	65.593	54.622	-16,7%
Biomassa ²	51.023	52.267	2,4%
Derivados do Petróleo ³	12.458	9.293	-25,4%
Nuclear	15.739	15.674	-0,4%
Carvão Vapor	16.257	14.204	-12,6%
Eólica	42.373	48.475	14,4%
Solar Fotovoltaica	832	3.461	316,1%
Outras ⁴	14.146	14.429	2,0%
Geração Total	589.327	601.396	2,0%

¹ Inclui geração distribuída

² Inclui lenha, bagaço de cana, biodiesel e lixo

³ Inclui óleo diesel e óleo combustível

⁴ Inclui outras fontes primárias, gás de coqueria e outras secundárias



Fonte: Balanço Energético Nacional (2019).

Dados de produção de energia do Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul 2015-2034 dá conta de que o RS tem capacidade instalada de geração de energia por biomassa de 90,5 MW. Desse total, 79,7 MW, oriundos da utilização de casca de arroz em seis usinas instaladas no Estado (Figura 7).

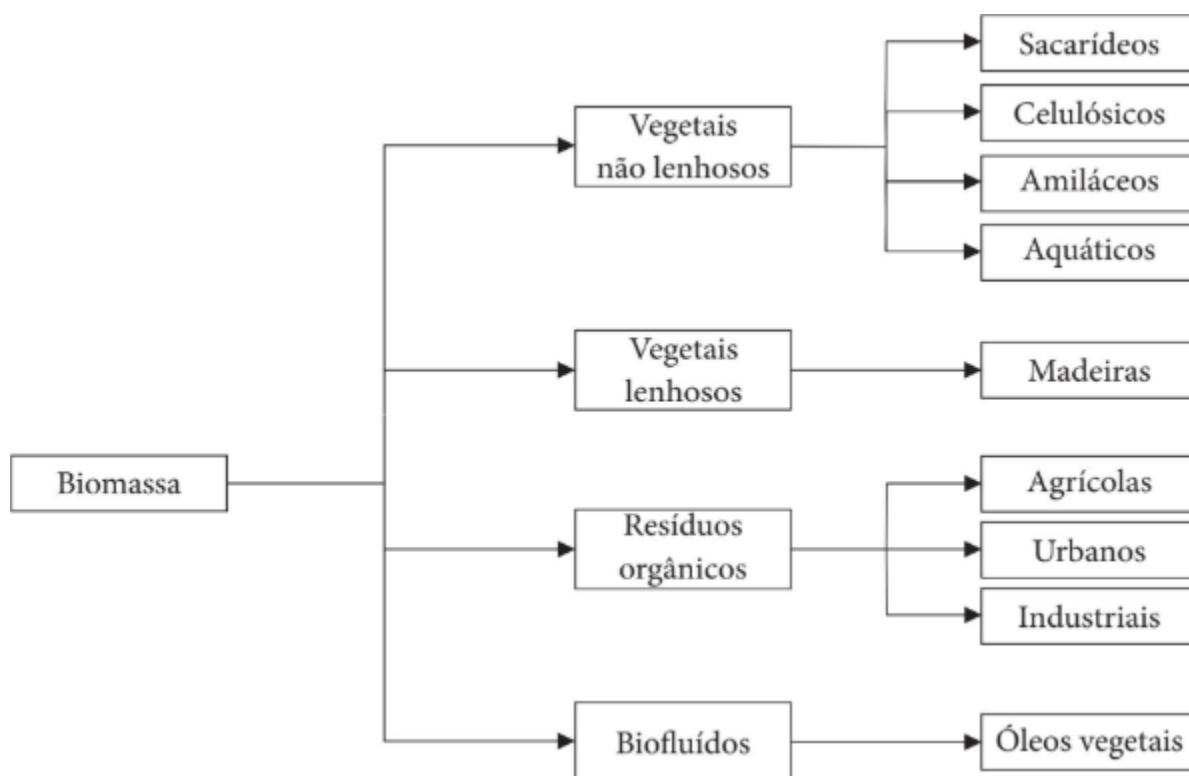
Figura 7 - Localização das usinas de geração de energia por biomassa no RS



Fonte: Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul (2014).

Para a indústria energética, a biomassa possui quatro espécies de origem: vegetais não lenhosos, vegetais lenhosos, resíduos orgânicos e bioflúidos (Figura 8). Já a composição da biomassa possui células, que variam de acordo com a estrutura da espécie utilizada; as paredes celulares são formadas de microfibrilas de celulose, rodeadas por uma matriz de hemicelulose e lignina, estando presentes ainda alguns lipídios e hidrocarbonetos que são solúveis em éter e vários tipos de compostos fenólicos, hidratados de carbono e proteínas que podem ser solúveis em benzeno, etanol ou água (PEDROZA *et al*, 2010).

Figura 8 - Fontes de biomassa



Fonte: Pedroza *et al* (2010).

A utilização de energia da biomassa é considerada estratégica para o futuro, por se tratar de uma fonte renovável e uma grande alternativa ambiental. A biomassa, portanto, é usada cada vez mais para atender uma variedade de necessidades de energia, como a geração de eletricidade, aquecimento de casas, abastecimento de veículos e fornecimento de calor para instalações industriais. As tecnologias utilizadas para isso variam: processos de combustão direta, processos bioquímicos, agroquímicos, termoquímicos, etc (FELIPETTO, 2007).

A conversão em processos de termoquímica pode ocorrer através de várias formas, entre elas: pirólise, gaseificação, liquefação direta ou extração com fluido supercrítico. A vantagem atual é a fabricação de softwares capazes de auxiliar e analisar os projetos, prevendo riscos, custos e benefícios, juntamente com modificações e otimizações do processo escolhido (CARDOSO; ARRUDA, SILVA, 2014).

A pirólise é o processo utilizado neste trabalho e detalhado em tópico próprio; no entanto, é realizada a partir de resíduos disponíveis no mercado doméstico e

industrial, que é vasto e cheio de potencial para deslocar grandes quantidades de combustíveis que atualmente são derivados de fontes do petróleo. O que se discute perante esse assunto é qual a melhor maneira de converter estes resíduos em produtos de maior valor, neste caso, bio-óleo, *syngas* e *biochar*, justificando o emprego de resíduos sólidos urbanos e industriais em processo térmico para viabilizar uma diversificação do plano energético brasileiro (CARDOSO, 2009).

2.5 Pirólise

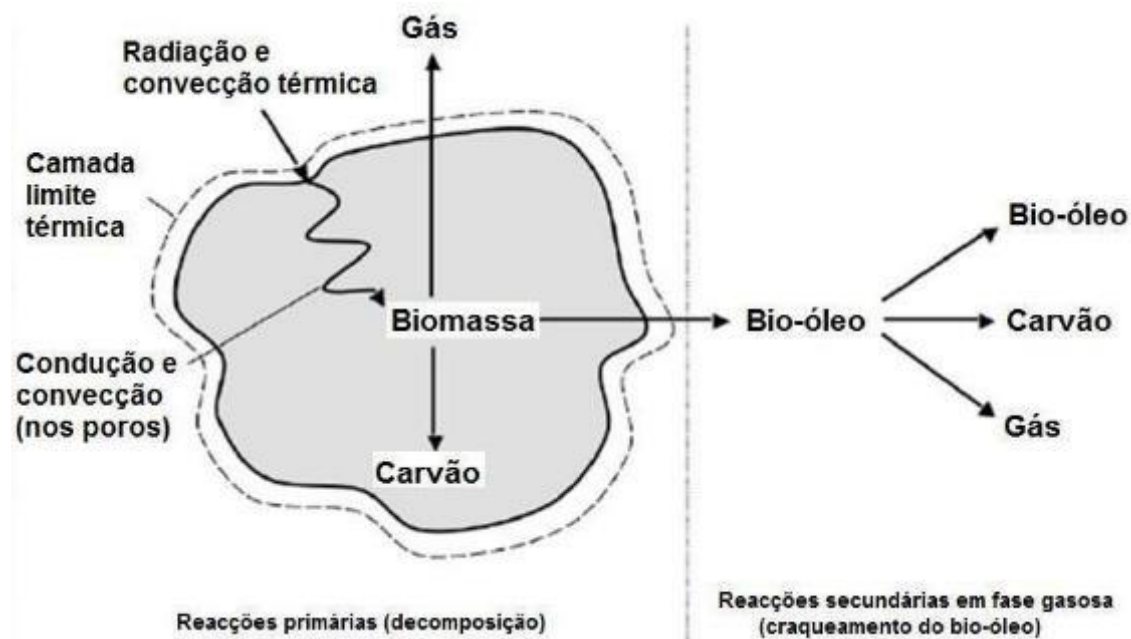
A pirólise é um processo muito antigo, utilizado a milhares de anos pela humanidade para produzir carvão; entretanto, os processos modernos relacionados a essa geração de energia são bastante recentes e amplamente estudados para que ocorra a otimização e a conscientização do destino dos resíduos, destacando-se a pirólise rápida de biomassa para obtenção de bio-óleo (SILVA, 2014). Essa tecnologia está em estágio inicial de desenvolvimento para comercialização, visto que os sistemas atuais de pirólise são considerados pequenos do ponto de vista de escala de processos industriais, a maioria deles registrando capacidade de apenas 5 toneladas/dia (RINGER; PUTSCHE; SCAHILL, 2006).

O desenvolvimento do reator de pirólise, portanto, é uma ferramenta para o processo de readequação do modelo de destinação e reaproveitamento dos resíduos, em que segundo Bridgwater (2012) o processamento é autossustentável, o subproduto gerado é energeticamente reutilizado, despertando o conhecimento tecnológico, prático e científico.

No processo de pirólise o resíduo é aquecido na ausência de ar (total ou quase) sendo convertida em produtos sólidos, gasosos e líquidos. Na pirólise lenta, o procedimento é realizado a 300 °C sob baixas taxas de aquecimento e longo tempo de permanência; na pirólise rápida, é realizada a 500 °C, sob reduzido tempo de residência (5 segundos); já na pirólise ultra-rápida, utilizam-se temperaturas entre 900 e 1000 °C, sob elevada taxa de aquecimento, e tempo de residência inferior a 0,5 segundos. Todas as formas são constituídas por um sistema de reatores, condensadores ou coletores (BRIDGWATER, 2012).

Segundo Basu (2010), na pirólise, grandes moléculas de hidrocarbonetos constituintes da biomassa são quebradas em moléculas menores e a faixa de temperatura ideal para o processamento energético se dá entre 300 e 650 °C. Na Figura 9 é representada a ação pirolítica em uma partícula de biomassa.

Figura 9 - Pirólise em uma partícula de biomassa



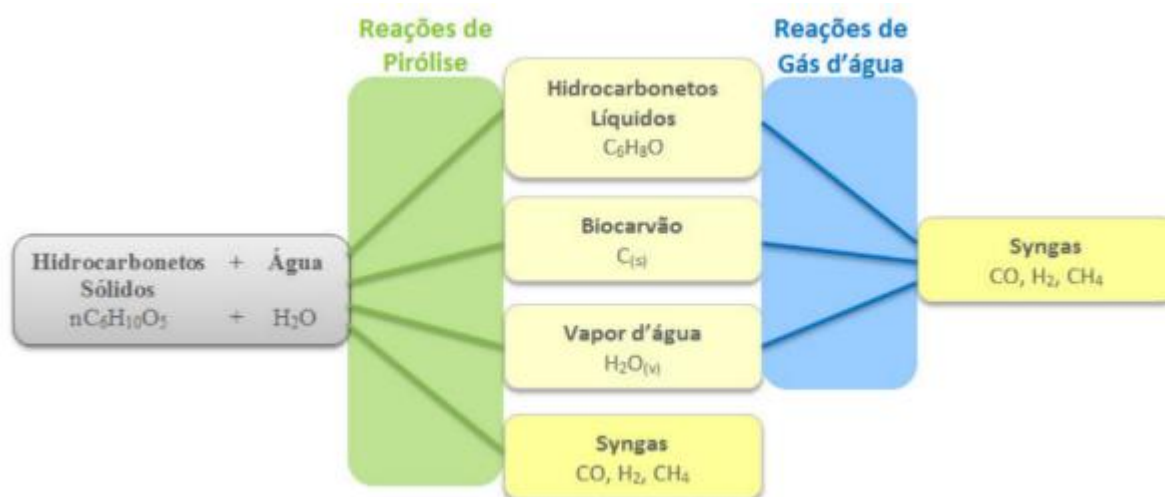
Fonte: Adaptado de BASU (2010).

Chen *et al* (2013) explica que a pirólise é um processo de degradação térmica de materiais que ocorre a partir da falta de oxigênio, resultando em produtos gasosos, líquidos e sólidos, que variam de acordo com as condições operacionais. Alguns dos principais compostos são monóxido e dióxido de carbono, hidrogênio e alguns hidrocarbonetos leves. Todos os produtos gerados possuem características combustíveis, como o bio-óleo (líquido), o *biochar* (sólido) e o *syngas* (gasoso).

Através deste processo pode-se obter diferentes subprodutos no final do ciclo, inclusive a obtenção do carvão ou da chamada cinza, que é diferente da resultante da carbonização em madeira, que tem o contato direto com a queima; no caso da pirólise ocorre a desidratação térmica em um ambiente fechado, desintegrando os resíduos expostos (LIMA, 2004).

A Figura 10 apresenta as reações envolvidas no processo de pirólise, e os produtos obtidos em cada etapa.

Figura 10 - Reações da pirólise e seus produtos



Fonte: Adaptado de LIMA (2004).

Segundo Chen *et al* (2013), para ter-se alta produção de carvão é preciso um processo de baixa temperatura e taxa de aquecimento na pirólise; por outro lado, se o objetivo for maximizar o rendimento do gás combustível, é preferível um processo de tempo de permanência de gás a alta temperatura e baixa taxa de aquecimento. Conforme Bridgwater (2012), “temperaturas mais baixas e tempos longos favorecem a produção de sólidos, temperaturas altas e tempos longos favorecem a conversão em gás e temperaturas moderadas e tempos curtos a produção de líquidos”, o que indica que as condições nas quais é realizada a pirólise (tempo e temperatura) determinam a composição química do produto final.

Segundo Lima (2007), no processamento de resíduo sólido urbano no reator de pirólise é capaz de se obter os seguintes subprodutos na produção de cinco toneladas:

- a) Óleo vegetal: 32 litros;
- b) Pó de carvão: 2 toneladas;
- c) Alcatrão: 18 litros;
- d) Água ácida: 18 litros;
- e) Lignina: 12 litros.

A pirólise, portanto, é uma alternativa para que tanto o lixo biodegradável não seja disposto em aterro sanitário, como os resíduos sólidos das indústrias de couro sejam reaproveitados, contribuindo assim, inclusive, para a atenuação das mudanças climáticas, já que, no primeiro caso, o resíduo não geraria mais metano, e no segundo, a disposição final seria a correta, sem contaminação de solo e lençol freático (AQUIM, 2008).

Outra vantagem seria a possibilidade da utilização do gás, do óleo e do carvão provenientes do processo de pirólise para geração de energia em substituição ao consumo de combustíveis fósseis. Os gases, por exemplo, poderiam ser condensados para uso direto como combustível ou refinados para produzir uma variedade de produtos químicos de alto valor agregado, e o carvão propriamente dito, poderia ser tranquilamente disposto em aterro que não geraria mais gases de efeito estufa. Ou seja, os resultados possuem potencial para geração de benefícios ambientais, econômicos e sociais, dentro dos princípios de sustentabilidade (KIPPER, 2013).

2.5.1 Vantagem

Com o objetivo de recuperação e transformação do resíduo, uma das vantagens para o processo de pirólise é o uso direto da energia térmica na geração de vapor, podendo ser utilizado na indústria e também na geração de energia elétrica. O processo é relativamente de baixo ruído e pouco odor, e para a implantação na indústria, seria necessária apenas uma pequena área. Além disso, conta-se com o reaproveitamento do próprio resíduo como fonte de calor para o processo, favorecendo também o baixo custo da matéria prima (LIMA, 2007).

2.5.2 Desvantagem

Como desvantagem do processo de pirólise pode-se citar, primeiramente, o alto custo do equipamento, da operação e da manutenção de todo o processo. Outro ponto que é preciso levar em consideração é o poder calorífico da matéria prima, que quando baixo e com alto teor de umidade, acarreta uma combustão de maior tempo com menor carga de energia retida, gastando mais energia no processo do que aquela retirada com o equipamento. E uma terceira questão é o alto custo para o obrigatório

controle dos efluentes gasosos, como dioxinas e furanos, que podem conter nos resíduos e são altamente perigosos para a saúde (WILLIAMS, 2005).

2.6 Bio-óleo

O interesse pelo bio-óleo vem aumentando devido à preocupação cada vez maior em reduzir as emissões de poluentes e a utilização de combustíveis fósseis. Esta é a fração líquida resultante do processo de pirólise de resíduos sólidos e é uma mistura entre água, oxigênio e diversos compostos hidro-carbonados de estruturas complexas, entre eles os hidroxialdeídos, hidroxicetonas, açúcares, ácidos carboxílicos e compostos fenólicos. Possuem poder calorífico que variam entre 13 e 18 MJ/kg e por isso podem ser aprimorados para combustíveis e diversos produtos químicos (SANTOS, 2011).

A pirólise tida como convencional, com temperatura final em torno de 500 a 600°C, produz parcelas tanto de carvão, como de bio-óleo e gases, pois o resíduo é aquecido numa taxa de aquecimento mais alta do que para a carbonização, mas que ainda é considerada baixa, e o tempo de residência dos vapores no reator varia de 5 a 30 minutos. Já a pirólise rápida é elaborada com o intuito de otimizar a produção de bio-óleo e gases, com taxa de aquecimento do resíduo e temperatura da pirólise baixas, não excedendo os 650 °C – ou 1000 °C para a produção de gás (BASU, 2010).

O emprego de RSU em processos térmicos contribui com a diversificação do plano energético brasileiro principalmente porque o bio-óleo é um líquido que apresenta alto poder calorífico e ausência de compostos sulfurados, o que aponta a chance desse produto ser aplicado como biocombustível (WILLIAMS, 2005). De acordo com a Agência Nacional de Petróleo (ANP) os biocombustíveis podem ser definidos como: “(...) derivados de resíduos renováveis que podem substituir, parcial ou totalmente, combustíveis derivados do petróleo e gás natural em motores a combustão ou em outro tipo de geração de energia”.

Basu (2010) afirma que o processo de pirólise rápida a baixas temperaturas gera em média de 60 a 75 % de bio-óleo, de 15 a 25 % de carvão e de 10 a 20 % de gases não condensáveis. O bio-óleo obtido é considerado promissor (Figura 11),

apresenta uma grande variedade de grupamentos químicos que variam conforme o resíduo utilizado, mas que torna o material um bom substituto do óleo combustível. O uso como um substituto para o combustível convencional de hidrocarbonetos tem sido demonstrado em motores, por exemplo, principalmente para produzir eletricidade ou gerar vapor, mas ainda não foi aprovado comercialmente. Também já existem testes do uso do bio-óleo em turbinas de combustão, que são alimentadas principalmente por destilados de petróleo ou gás natural (ALMEIDA, 2008).

Figura 11 - Bio-óleo produzido através do processo de pirólise em laboratório



Fonte: ALMEIDA (2008).

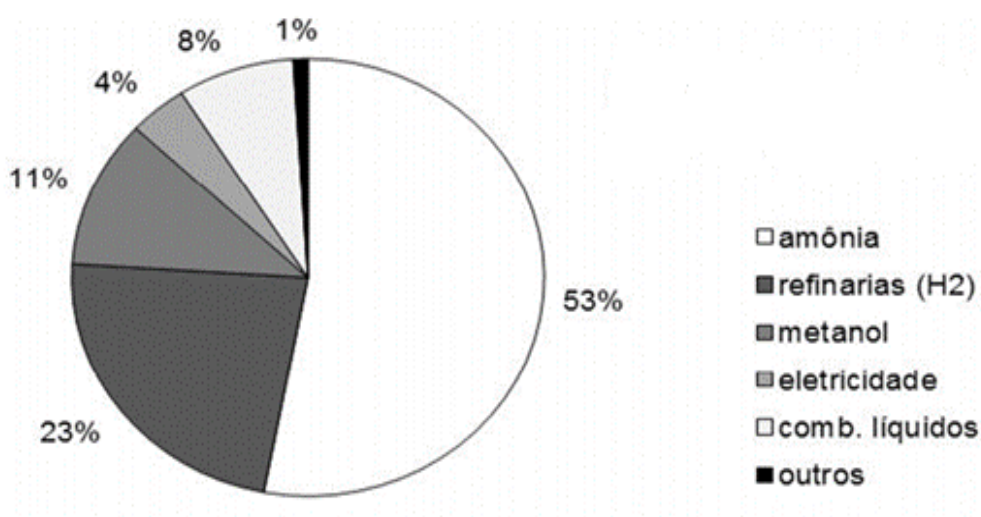
2.7 Syngas

Por meio da reação da pirólise é possível obter o *syngas* ou também chamado gás de síntese ($\text{CO} + \text{H}_2$), rico em hidrogênio e monóxido de carbono, mas as parcelas destes e de outros gases na composição final dependem da matéria prima a ser pirolisada. Por definição, os RSU possuem um conteúdo energético significativo que varia conforme a espécie utilizada, entretanto, o poder calorífico geralmente é baixo se comparado com gás natural e sua obtenção possui um caráter socioambiental necessário (BRIDGWATER, 2012).

Para maior rendimento de *syngas* são necessárias temperaturas mais elevadas e um longo tempo de residência no processo de pirólise, para que a maior quantidade de líquido e de sólido seja convertida em gás. As propriedades do *syngas* variam de acordo com o resíduo utilizado e das condições de funcionamento do reator e seu poder calorífico interior varia entre 3 e 10 MJ.kg⁻¹ (WILLIAMS, 2005).

De acordo com Boerrigter e Rauch (2005), as formas de aproveitamento do *syngas* são diversas e geralmente é utilizado como fonte de energia elétrica ou mecânica (direta ou indireta), se transformando em energia útil na forma de calor em fornos ou aquecedores (Figura 12).

Figura 12 - Principais formas de utilização do gás de síntese



Fonte: Adaptado de Boerrigter; Rauch (2005).

De acordo com Rodrigues *et al* (2014) o gás de síntese formado durante o tratamento térmico de resíduos sólidos é purificado por meio de um processo de lavagem, ou seja, é gerado o gás com alto teor de pureza, sem nenhum agente contaminante, diferente das tecnologias tradicionais desse tipo. Esses sistemas não produzem os resíduos perigosos como as cinzas voláteis que contém alta concentração de dioxinas e furanos, e os resíduos se tornam basicamente metálicos, oriundos de parcelas que não foram separadas adequadamente nas etapas prévias ao processo. O resíduo inerte é definido como *biochar* e será abordado no tópico seguinte.

2.8 Biochar

A fração sólida resultante do processo é chamada de *biochar* ou simplesmente bio carvão, obtido a partir de qualquer fonte de resíduo, porém as variações de porosidade, superfície específica, PH, capacidade de troca iônica, entre outras, são devidas às diferenças existentes também na composição química morfologia dos resíduos utilizados no processo. A porosidade, por exemplo, é resultante das estruturas de células e poros do material de origem, assim como a composição química final (MAIA, 2011).

Registros antigos de composição da terra preta na região americana indicam a presença de compostos de carbono, e datam de 8000 a.C. Há indícios de que a espécie humana já havia gerado carvão por meio da queima de amontoados de biomassa há mais de 30 mil anos, já que os organismos vivos não têm capacidade de processar o carvão, e o carbono pode permanecer na terra por milhares de anos. Posteriormente às pesquisas dos séculos XVII e XVIII sobre a fertilidade da terra preta, no século seguinte uma importante descoberta foi feita acerca do tema: o armazenamento de biomassa e carvão no solo tem potencial para sequestrar carbono da atmosfera (PRONATURA, 2012).

Com os avanços do estudo sobre o tema, atualmente afirma-se que a terra preta tem melhor capacidade de manter a fertilidade de um solo em comparação à utilização de químicos fertilizantes. Devido a isso, o *biochar* é um composto de material organofuncionalizado que vem sendo estudado, entre outras aplicações, na incorporação do solo para aceleração da degradação da matéria orgânica ou no balanceamento da carga de nitrogênio (CONZ, 2015).

De acordo com Pro-natura (2012), o *biochar* já é utilizado na agricultura como adsorvente alternativo para remover diferentes tipos de contaminantes, inclusive metal pesado, e para melhorar o desempenho de nutrientes. Também de acordo com o autor, as características físicas não dependem somente da matéria-prima e as condições da pirólise, mas também do manuseio pré e pós carbonização. Na prática, o mesmo autor aponta estudos realizados em campos de milho no Quênia no ano de

2008 em que a produção dobrou em sítios recuperados pelo *biochar*, quando comparados com aqueles recuperados por fertilizantes químicos.

Demirbas (2009) explica que para a obtenção de *biochar* em grande quantidade e através do processo de pirólise são necessárias baixas temperaturas e baixas taxas de aquecimento. Já a granulometria é associada à alta reatividade do resíduo gerado no processo: quanto menor a granulometria, mais reativo é o carvão gerado. Face ao exposto, pode-se entender que a temperatura de reação é fator decisivo para composição das características físico-químicas do *biochar* gerado, sendo apontada por Pereira *et al* (2016) como o parâmetro mais importante a se considerar no processo de pirólise.

Complementarmente, Pereira *et al* (2016) explica que temperaturas relativamente baixas podem gerar *biochar* com baixo pH, sendo este o indicado para o emprego como fertilizante em solos de pH alto. A Figura 13 ilustra um equipamento de pirólise, utilizado para produzir bio carvão.

Figura 13 - Pyro-6F: máquina de pirólise, atualmente fabricadas e vendidas pela empresa Green Charcoal Internacional, para produzir bio carvão



Fonte: PRO-NATURA (2019).

Segundo Chen *et al* (2013), o *biochar* pode ser utilizado como catalisador para o controle de poluição do ar, principalmente para conversão de amônia, e como catalisador para a produção de biodiesel, além de servir como suporte para catalisadores na produção de *syngas*.

Basu (2010) afirma que o *biochar* obtido na pirólise possui uma estrutura porosa e uma área superficial apropriada para a utilização como carvão ativo (Figura 14). Levando em consideração que, segundo o *BP Statistical Review of World Energy*, em 2015 o Brasil consumiu 15,3 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (TEP) e produziu 3,2 milhões de TEP de carvão, com a utilização mais ampla das diversas formas de pirólise, o *biochar* poderia possuir uma parcela significativa nesses números.

Figura 14 - *Biochar* produzido em ensaio



Fonte: SILVEIRA (2015).

2.9 Transferência de calor

Para os métodos numéricos e propriedades, as equações que descrevem a transferência de calor e mecânica dos fluídos, são muitas vezes utilizadas para procedimentos de escoamentos compressíveis e incompressíveis, sendo eles de regime laminar ou turbulento (FOGLER, 2014).

O princípio do fluxo de entrada e saída de massa, no conceito da conservação da energia e massa, descreve o conceito do balanço de massa. (ROBERTS, 2010).

a) Equação do balanço de massa com acúmulo

$$\sum entrada = \sum acúmulo + \sum saída \quad (1)$$

b) Equação da Continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot \rho \vec{v} \quad (2)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido, t é o tempo e \vec{v} o vetor velocidade. Fazendo com que a taxa líquida da massa acumulada seja igual à diferença entre a taxa de fluxo de massa para dentro e para fora, se faz a conservação da massa.

c) Equação da quantidade de movimento

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v = -[\nabla \cdot \rho v v] - \nabla p - [\nabla \cdot \tau] + \rho g \quad (3)$$

Onde p é o termo de pressão, τ é a tensão de cisalhamento e g é a aceleração da gravidade. Fazendo com que a taxa líquida da quantidade de movimento acumulada seja igual à diferença entra a taxa de quantidade de movimento para dentro e para fora, somadas às forças que agem no sistema, se faz a conservação da quantidade de movimento.

d) Equação da energia

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = -\nabla \cdot q + \frac{Dp}{Dt} + \dot{S} \quad (4)$$

Onde q representa o fluxo de calor, C_p é o calor específico do fluido, T é a temperatura, k é a condutividade térmica do fluido e S representa o calor gerado/consumido devido as reações químicas na mistura gasosa.

A taxa da acumulação da energia interna e cinética em uma região é igual à taxa líquida da energia interna e cinética devida à convecção, mais a taxa líquida do fluxo de calor devida à condução, mais a taxa de trabalho feita no fluido, mais o termo devido às reações químicas.

A equação desenvolvida por Demirbas (1997) para cálculo do poder calorífico é baseado nos calores de oxirredução dos componentes, que através da análise elementar é coletado C, H, O e N que são os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, respectivamente.

e) Equação do Poder Calorífico

$$PCS \left(\frac{MJ}{kg} \right) = 33,5 * C + 142,3 * H - 15,4 * O - 14,5 * N \quad (5)$$

Para o cálculo, o estudo da equação deduz diferenças inferiores a 2 % do valor experimental do valor teórico.

3 METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa quanto ao modo de abordagem empregado é quantitativa. Segundo Dalfovo, Lana, Silveira (2008), o estudo quantitativo já tem um modelo de pesquisa onde, com base neste, pode formular suas hipóteses e estudos, e através de provas dos resultados, a pesquisa é comprovada com veracidade.

O desenvolvimento e o planejamento do protótipo do reator de pirólise deram-se por um conjunto de testes e ensaios para análise do potencial energético, por meio de critérios estatísticos e científicos para verificar os meios de troca térmica dos resíduos utilizados para captação de energia e fontes de calor.

Por fim, foi desenvolvido o protótipo de um reator de pirólise, realizada sua avaliação com os resíduos anteriormente conceituados, realizada a determinação e especificação dos resíduos de um centro de triagem de um município do Vale do Taquari, bem como dos resíduos de curtumes.

No tópico seguinte, são detalhados os ensaios de temperaturas e a realização do experimento propriamente dito, em que foi analisada a viabilidade de uso dessa tecnologia e o seu potencial energético, através, principalmente, da comparação entre o sistema atual de destinação (aterro sanitário) com a pirólise.

Conforme definição da lei nacional, que trata da Política Nacional de Resíduos Sólidos, procurou-se métodos e tecnologias para o melhor aproveitamento energético dos resíduos, como foco do estudo neste caso, através de um reator de pirólise em

que o rejeito passa por um processo de incineração, transformando resíduo sólido em fonte de energia.

Esse mecanismo é norteado por princípios da decomposição física e química e da ação de carga térmica e ausência de oxigênio, onde as temperaturas podem variar de 300 a 1000 °C.

O protótipo estudado na pesquisa é estilo batelada, com objetivo de analisar os resíduos de forma individual (doméstico e industrial) e os diferentes tipos de fontes de energia resultantes.

Para o melhor desenvolvimento do processo de análise dos potenciais energéticos, foi realizada a proposta em duas etapas de processamento, subdivididas em duas com cada resíduo:

- a) Resíduo Sólido Urbano – Doméstico
 - I. Secagem do resíduo
 - II. Trituração
- b) Resíduo Sólido Industrial – Couro *wet blue*
 - I. Secagem do resíduo
 - II. Trituração

Para a conclusão, realizou-se a análise das características dos resíduos em forma de carvão, bio-óleo e gás.

3.1 Desenvolvimento do Protótipo

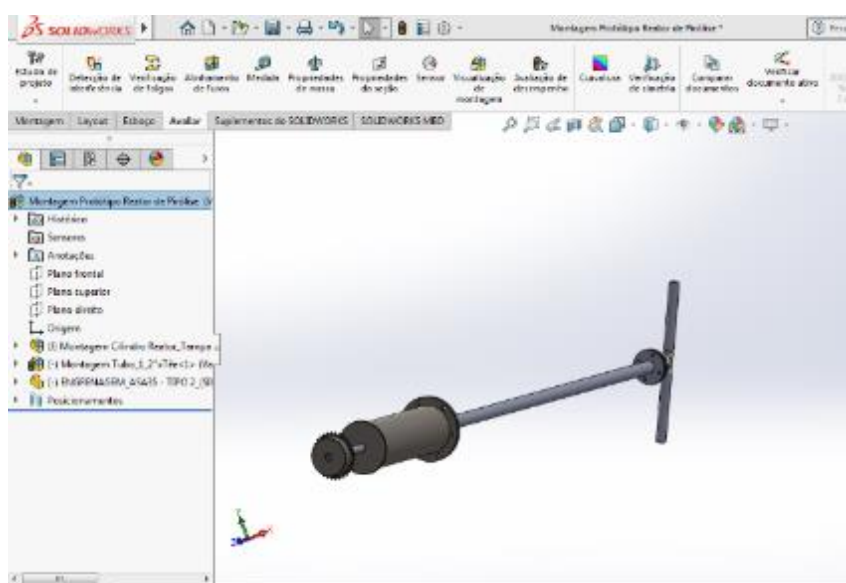
A proposta em análise é de um reator do tipo batelada com eixo rotativo, que conforme Fogler (2014), quanto mais tempo o reagente permanecer na estrutura do reator, mais o resíduo será convertido em produto, até que atingido o equilíbrio das reações. Já de acordo com Roberts (2010), a definição de um reator batelada se dá pelo não escoamento do resíduo entre as fronteiras do sistema quando carregado e seu processo ativado.

Por se tratar de um processo em escala de bancada e tão somente para análise da validação do potencial energético dos resíduos, o método de fluxo contínuo acarretaria numa quantidade de resíduo a ser processada ainda maior, pois a movimentação do fuso é constante, o que impossibilitaria a análise de forma precisa e individual, neste estudo.

Para o encaminhamento da fabricação do reator de forma geral, elaborou-se um projeto em *software* tipo CAD (do inglês Computer Aided Design, que significa Desenho Assistido por Computador no português), no qual foram dimensionados os componentes, utilizando o SolidWorks:

- a) Bocal de alimentação do resíduo
- b) Cilindro do leito rotativo do reator
- c) Flanges de fechamento do reator
- d) Tubulação de condensação dos gases
- e) Conexão fixa do elemento de separação do óleo e gás
- f) Mesa de apoio da transmissão
- g) Chassis da estrutura
- h) Estrutura de aquecimento do reator
- i) Tubulação do gás (GLP) para aquecimento sistema

Figura 15 - Protótipo Reator Pirólise Rotativa



Fonte: Do autor (2020).

Para que o processo seja mais eficiente, conforme Roberts (2010), os reatores do tipo batelada com eixo rotatório devem ser agitados, para que o coeficiente de transferência de calor entre o seu meio reacional e a camisa torne o resíduo mais homogêneo; conseqüentemente, a agitação interfere positivamente na mistura e na troca térmica.

Em função do princípio em que o processo se encontra na decomposição térmica do resíduo, as transferências de calor expõem as trocas convectivas, radiativas e condutivas, além disso, através do movimento das partículas sólidas também pode-se considerar um coeficiente para troca térmica (TOMAZ, 1998).

Para tal experimento, muitas variáveis foram consideradas, como temperatura, composição do resíduo que sofreu o processo e o tempo de residência para obtenção e retenção dos subprodutos. (BROUST, 2009).

O desenvolvimento do protótipo se deu por meios de componentes de aço carbono 1020, sendo o eixo do leito rotativo do protótipo, por se tratar de um protótipo, com poucas cargas excessivas de processo; não foi considerado o tratamento a corrosão no equipamento, para que fosse aplicado outro tipo de material na elaboração do equipamento.

3.2 Avaliação do protótipo com diferentes resíduos

Realizou-se testes com diferentes tipos de resíduos, sendo sólidos domésticos e sólidos industriais, com processo individual de cada tipo de material para verificação da melhor eficiência energética.

Para que fosse obtida a melhor análise, as frações dos resíduos passaram por uma etapa de pré-secagem e separação quanto ao RSU, retirando, por exemplo, as matérias orgânicas dos demais resíduos urbanos. Os resíduos também foram classificados quanto ao seu tamanho, primeiramente por causa do tamanho do reator, já que é apenas avaliativo e de escala de bancada, e para que o processo ocorresse de maneira mais rápida, facilitando a verificação da análise.

O procedimento de avaliação dos resíduos se deu através do estabelecimento de critérios científicos e estatísticos, de modo a se observar a influência das inúmeras variáveis nos resultados de um dado sistema, processo ou equipamento.

Os parâmetros de verificação dos métodos de análise, como os planejamentos experimentais, são utilizados em pesquisas e ajustes industriais, entretanto, algumas vezes com propósitos diferentes. Na indústria, especificamente, tem-se o foco de coletar o maior número de informações imparciais, com a influência de poder agregar conhecimento no processo produtivo (FONTES, 2011).

Ante qualquer procedimento de funcionamento do reator, verificou-se os diferentes resíduos pirolisados, já que, assim como o volume da matéria, a umidade também é um parâmetro muito importante que precisa ser verificado, pois influencia no tempo de residência, temperatura e extração do óleo. Para tal, realizou-se a pré-secagem de todo material a ser processado, tanto no resíduo sólido urbano, como também no industrial, e uma pré-seleção quanto à granulometria do resíduo.

A validação dos experimentos foi feita por amostragem, com o objetivo de verificar as diversas variáveis que podem determinar a influência de todo processamento da matéria prima a ser estudada.

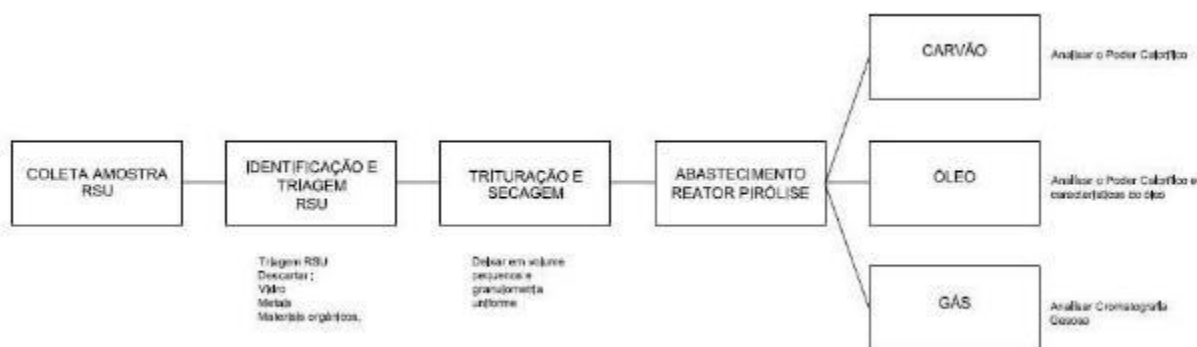
Critérios de avaliação:

- a) Determinar quais as variáveis do processo;
- b) Conceder valores nos procedimentos variáveis de modo a otimizar os resultados e minimizar as consequências das mesmas.

3.2.1 Resíduo de um centro de triagem de um município do Vale do Taquari

Para verificação e análise do resíduo sólido urbano, coletou-se matéria de um centro de triagem de um município do Vale do Taquari, com o intuito de obter uma noção dos resíduos que estão em nosso meio e que possuem potencial para fonte de energia. Desta forma, também foi possível utilizar resíduos que são mais abundantes e estão mais presentes no nosso contexto de vivência. Na Figura 16 está esquematizado o fluxograma do processo de pirólise para o resíduo sólido urbano.

Figura 16 - Fluxograma Processo RSU



Fonte: Do autor (2020).

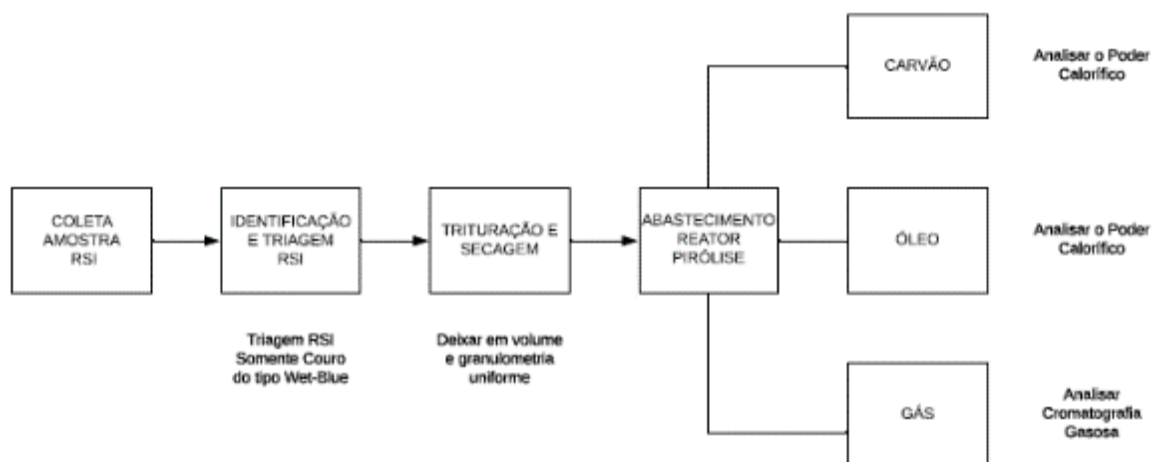
3.2.2 Resíduo de curtume

A validação do procedimento para análise do resíduo sólido industrial se dará pelo couro do tipo *wet blue*, rico em matéria orgânica e sais de cromo, que se descartado de forma inadequada gera um impacto ambiental enorme no solo e na água.

A análise deste resíduo será feita através de suas características físico-químicas, passando por todos procedimentos também realizados nos resíduos sólidos urbanos, como pré-secagem e diminuição da granulometria.

Os procedimentos como o tempo de residência do resíduo, granulometria do material, temperatura do reator, teor de umidade, são variáveis que precisam ser analisadas no processo, podendo afetar no resultado qualitativamente e também quantitativamente (SANTOS, 2014). Na Figura 17 está esquematizado o fluxograma do processo de pirólise para o resíduo sólido industrial.

Figura 17 - Fluxograma Processo RSI



Fonte: Do autor (2020).

3.3 Realização dos experimentos

Para verificar os subprodutos gerados pelo processo do protótipo de pirólise analisou-se os dois tipos de resíduos, RSU e RSI, para que fosse verificado o poder calorífico de cada um deles, através da análise elementar.

Cada tipo de resíduo foi analisado em amostra de carvão, óleo e gás, para identificar o potencial energético ou poder calorífico com base nos laboratórios.

3.3.1 Análise do Carvão e Óleo

Na verificação do subproduto gerado pela pirólise, como o carvão e óleo, estudou-se e identificou-se o poder calorífico, através de Análise Elementar. As amostras foram pesadas adotando-se um intervalo entre 1 e 2 mg, em capsulas de estanho para sólidos e líquido.

Utilizou-se uma micro balança de ultra precisão para medição das massas, e as determinações foram feitas através do equipamento “Equipamento CHNS/O Analyzer 2400 Series II” da marca PerkinElmer (Figura 18).

Figura 18 - Equipamento CHNS/O Analyzer 2400 Series II



Fonte: Do autor (2020).

As temperaturas empregadas nas colunas de combustão e redução foram, respectivamente, 950 °C e 640 °C. As pressões dos gases O₂ e He foram, respectivamente, 140 kPa e 105 kPa. O tempo de preenchimento da coluna de combustão foi de 30 segundos e o tempo total de análise, aproximadamente 5 minutos. Realizou-se as análises no Instituto de Química – Campus do Vale na Universidade do Rio Grande do Sul.

3.3.2 Análise do Gás

A análise do gás obtido no processo foi realizada no Centro de Pesquisa em Energias e Tecnologias Sustentáveis da Universidade do Vale do Taquari.

Analisou-se os índices de CH₄, CO₂, H₂, O₂ e N₂ por cromatografia gasosa, utilizando-se o equipamento modelo Clarus 580 GC, da marca PerkinElmer, equipado com Detector por Condutividade Térmica (TCD) e Detector Fotométrico de Chama (FPD) para identificação de H₂S. A Tabela 2 apresenta as características do cromatógrafo gasoso utilizado, e a Figura 19 ilustra o equipamento.

Tabela 2 - Características do Cromatógrafo Gasoso

Característica do Cromatógrafo Gasoso	
Coluna	Empacotadora (Hayesep e Peneira Molecular)
Gás de arraste e referência do TCD	Argônio
Gás de combustão do FPD	Hidrogênio
Temperatura do forno	60 °C
Tipo e temperatura dos detectores	TCD (250 °C) e FPD (325 °C)
Software	TotalChron & Int LINK

Fonte: Do autor (2020).

Figura 19 - Equipamento Cromatógrafo Gasoso



Fonte: Do autor (2020).

4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos, os desafios e as dificuldades encontradas, durante a realização das análises.

4.1 Cilindro do leito, tubulação de saída dos gases

Para possibilitar a fabricação e a montagem dos conjuntos e subconjuntos do protótipo, construiu-se um *checklist* dos componentes necessários, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Componentes do Cilindro do leito e tubulação de saída dos gases

Item	Descrição
1	Tampa Cega com eixo de transmissão
2	Cilindro do Leito
3	Flange para fechamento do leito
4	Tampa com eixo de saída dos gases
5	Eixo de saída dos gases

Fonte: Do autor (2020).

Com os componentes listados, iniciou-se as etapas de fabricação, corte de plasma das tampas e flange, corte dos tubos, solda e usinagem dos bocais e flanges, para melhor fechamento e evitar vazamento de gases durante o processo de pirólise.

Na construção do protótipo, o primeiro questionamento que surgiu foi em relação a como seria o cilindro para o processamento dos resíduos; posteriormente, a dúvida de como seria a retirada dos subprodutos gerados, após processamento.

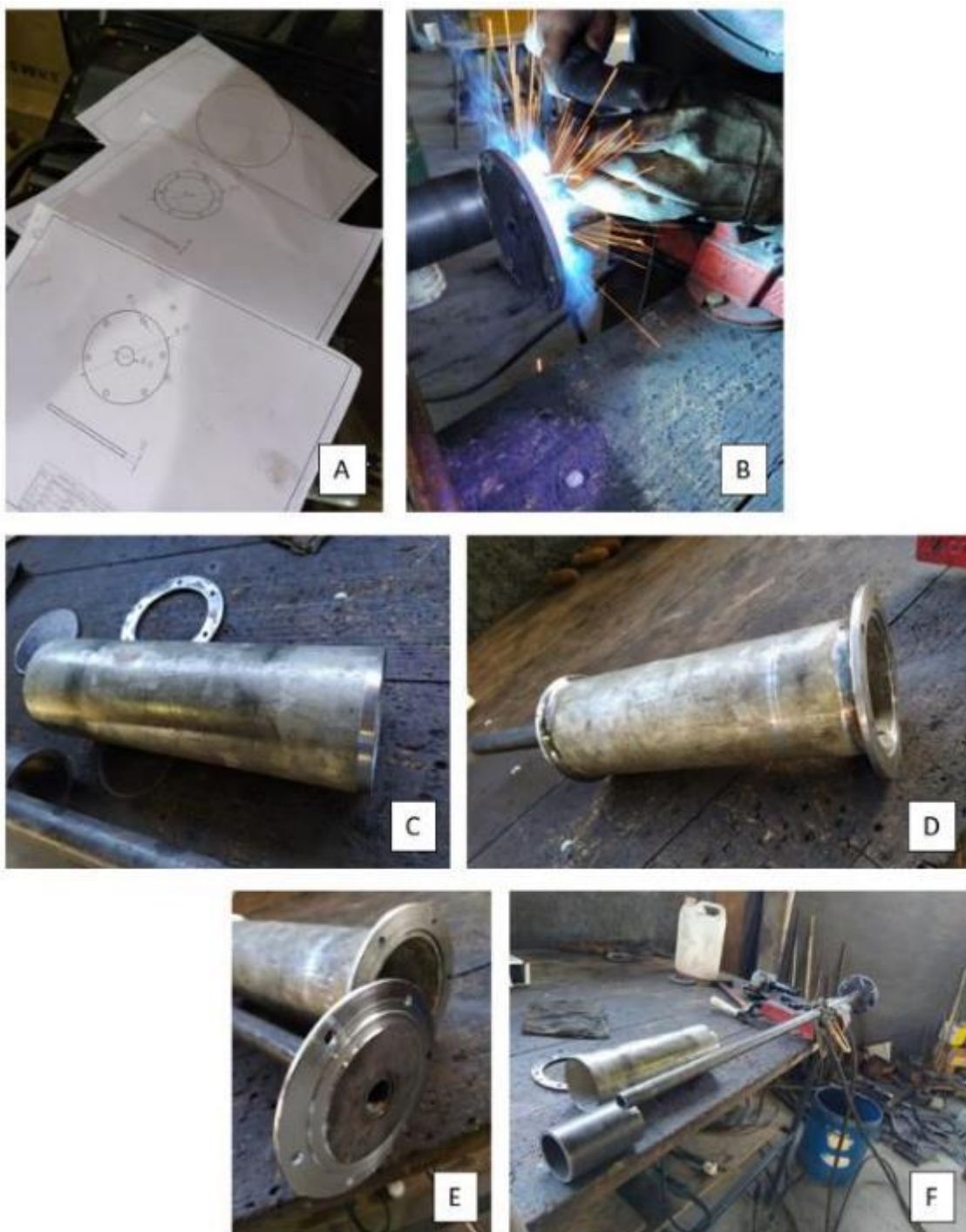
Para fabricação dos flanges, realizou-se o corte de plasma da chapa (Figura 20 B), na empresa Sistemilk Ferragens e Equipamentos em Bom Retiro do Sul, de acordo com desenhos de projetos, ilustrados na Figura 20 A.

O cilindro do leite foi dimensionado com o diâmetro de 4" x 300 mm, totalizando um volume de 2,43 litros para o processo. O corte e solda dos componentes (itens 1, 2 e 3, relacionados na Tabela 3) foi realizado na empresa Cyborg Industrial em Fazenda Vilanova. A Figura 20 C ilustra os componentes confeccionados.

Sabe-se que a vedação de gases, em qualquer processo, é de grande dificuldade; por isso, a usinagem do flange (Figura 20 E) e da tampa da saída dos gases se fez necessária, conforme listado no item 4 da Tabela 3, para melhorar o encaixe e alinhamento das furações. Tal atividade foi realizada na empresa FERMEC Usinagem na cidade de Bom Retiro do Sul.

Para a retirada e coleta dos subprodutos gerados, como carvão, óleo e gás, confeccionou-se um coletor com os flanges parafusados, para a coleta do carvão; por ser um processo a batelada, não havia nenhum risco ou problema que influenciaria o teste (Figura 20 D). A coleta do óleo e gás foi pensada conforme a Figura 20 F, com um tubo com comprimento de 1000 mm, listado no item 5 da Tabela 3, em que o gás em alta temperatura transcorre este caminho sofrendo resfriamento, condensando, de vapor em alta temperatura a óleo.

Figura 20 - Componentes do Cilindro do leito e tubulação de saída dos gases: A) Desenhos das furações, posições, diâmetros e espessura de cada peça e chapa; B) Corte plasma; C) Corte e solda do cilindro do leito; D) Flanges do cilindro parafusados; E) Flange e tampa de saída dos gases, usinados; F) Tubo coletor de óleo e gás



Fonte: Do autor (2020).

4.2 Aquecimento do cilindro do leito

Como um dos objetivos foi realizar o balanço energético do sistema, o aquecimento por resistência elétrica deu-se como uma opção, pela facilidade de controle que o sistema está inserido e coleta das informações. No entanto, encontrou-se dificuldades para obtenção deste sistema de aquecimento; como o dimensionamento do cilindro já estava definido, não se encontrou fabricantes de resistência elétrica que fosse capaz de atingir e manter a temperatura necessária ao processo, superior a 350°C.

Assim sendo, definiu-se que o sistema de aquecimento do cilindro do leito seria por chama, utilizando gás liquefeito de petróleo (GLP), com queimador centralizado ao tubo do leito, de modo que o contato da chama fosse uniforme em todo comprimento do cilindro; desta forma, com a rotação do mesmo, a temperatura se daria uniforme na parte interna do reator.

Com o sistema de aquecimento definido, construiu-se os subconjuntos para que a proposta do reator fosse elaborada, como por exemplo as fixações das tubulações e controle de gás e ponto do queimador para o aquecimento. A Tabela 4 apresenta os componentes necessários para a construção do sistema de aquecimento do reator.

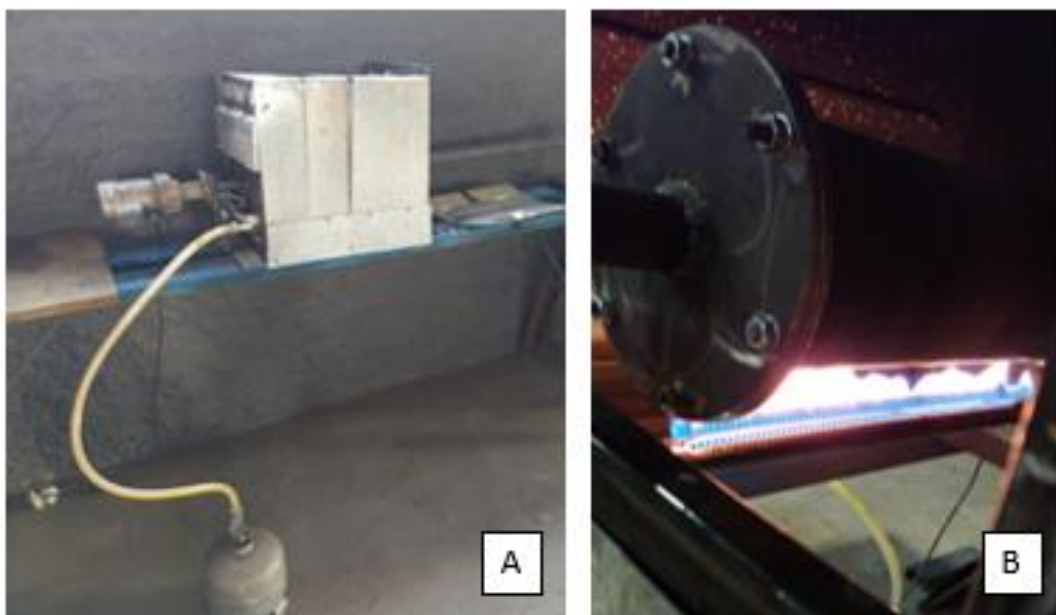
Tabela 4 - Componentes do sistema de aquecimento do reator

Item	Descrição
1	Queimador
2	Tubulação de controle de chama
3	Mangueira de Gás 3/8 Amarela
4	Registro de Fechamento de Gás
5	Botijão de Gás de 2kg
6	Cabine de aquecimento
7	Isolamento térmico

Fonte: Do autor (2020).

A Figura 21 apresenta o sistema de aquecimento do reator, ilustrando na imagem A, os itens 3, 4, 5 e 7 da Tabela 4, e na imagem B, o item 1.

Figura 21 - Conjunto do sistema de aquecimento do reator.



Fonte: Do autor (2020).

O botijão de gás, o registro e a mangueira foram itens adquiridos em lojas de ferramentas, sistema convencional de uso para acendimento de fogão.

O queimador, apresentado na Figura 21 B, tem comprimento de 400 mm e $\varnothing 1.1/4''$, fixado no centro da cabine e poucos centímetros de distância do leito; sua chama foi fixada em toda extensão do cilindro, para melhor troca térmica dos resíduos durante seu processamento.

Uma dificuldade encontrada com a utilização do sistema de aquecimento a gás foi em relação à tubulação de controle de gás, que apresentou vazamentos, o que poderia influenciar nos valores do balanço energético. Confeccionou-se então uma ferramenta para prensar o tubo e posteriormente fazer a solda das áreas que ainda ficaria com o vazamento, o processo foi realizado em uma prensa hidráulica de 100 ton e a soldagem TIG (Tungtem Inert Gas) sem adição de material, realizado na empresa Sistemilk (Figura 22).

Figura 22 - Vedação da tubulação de controle de chama



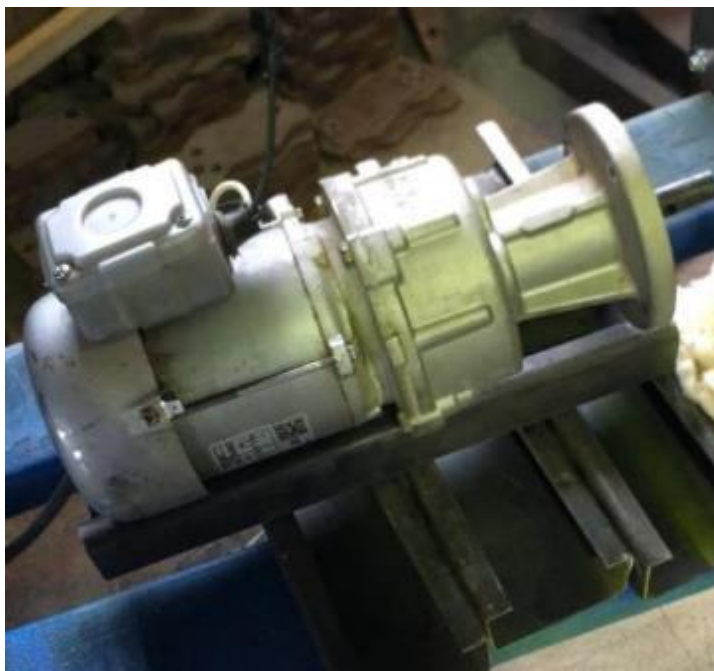
Fonte: Do autor (2020).

4.3 Acionamento do cilindro do leito

O protótipo de reator de pirólise confeccionado é do estilo batelada com leito rotativo, para facilitar a transferência de calor entre o cilindro e o resíduo dentro do leito. Para o estudo do balanço energético do sistema, não se considerou a energia do motor como sendo energia de injeção do processo; sendo assim, não foram consideradas, também, a potência e a rotação do mesmo.

Ao sistema foi instalado com motorreductor Hercules 1/20 cv de 29 rpm, fornecido pela empresa Cyborg (Figura 23).

Figura 23 - Motorreductor para acionamento do leito



Fonte: Do autor (2020).

A fixação e o acoplamento do motorreductor foram realizados com uma estrutura de cantoneira 3/16" x 1.1/4" (Figura 24).

Figura 24 - Fixação do motorreductor na cabine do protótipo



Fonte: Do autor (2020).

Figura 26 - Balança de precisão



Fonte: Do autor (2020).

4.5 Ensaios preliminares

Realizou-se ensaios preliminares com o objetivo de prever falhas e evitar que parâmetros de medição e de operação fossem comprometidos quando realizado com o resíduo do processo do estudo.

Nos ensaios preliminares, observou-se que seria necessária a implantação de uma junta de vedação de alta temperatura, no protótipo, em função da presença de um vazamento de gás do resíduo, ilustrado na Figura 27. Somente a usinagem para o encaixe da tampa no flange do cilindro não foi suficiente para que os gases ficassem retidos no leito do cilindro, e só retirado no final do corpo do tubo de condensação.

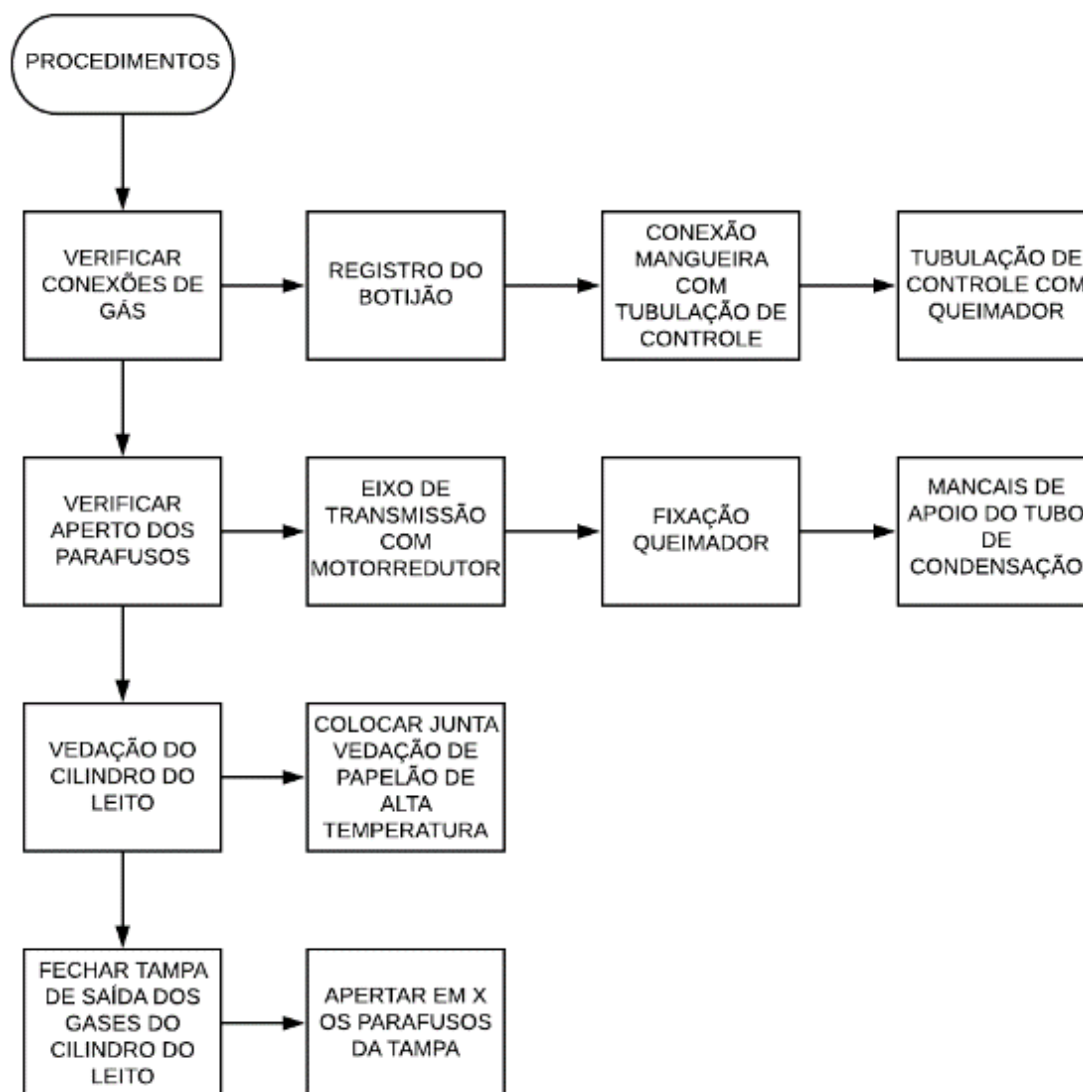
Figura 27 - Vazamento de gás no ensaio preliminar



Fonte: Do autor (2020).

Através do ensaio preliminar, também foram adotados alguns procedimentos para segurança do usuário, do equipamento e do estudo proposto (Figura 28).

Figura 28 - Diagrama para procedimento do processo experimental de pirólise



Fonte: Do autor (2020).

4.6 Ensaio do processo de RSU

4.6.1 Coleta e separação do resíduo RSU

O resíduo sólido urbano processado neste experimento foi obtido através do Centro de Triagem do município de Estrela/RS, no qual foi realizado uma seleção dos materiais, sendo alumínio, vidro, metais e matéria orgânica descartado da amostra.

Dos resíduos, foram utilizados como amostra somente os de origem polimérica, como ilustra a Figura 29.

Figura 29 - Amostra de RSU - Polímeros



Fonte: Do autor (2020).

4.6.2 Procedimento para processo RSU

Com o resíduo separado e triturado, mediu-se seu volume e peso, conforme Figura 30, que apresentou uma amostra de RSU com 150 g e com volume 0,011m³.

Figura 30 - Amostragem RSU para processo



Fonte: Do autor (2020).

A próxima etapa realizada foi a armazenagem do RSU no reator; sabendo-se da baixa densidade do material, a dificuldade foi obter uma amostra que apresentasse um peso considerável, de modo a ter uma relação com a realidade, e que ao mesmo tempo coubesse dentro do leito (Figura 31).

Figura 31 - Armazenagem RSU para processo



Fonte: Do autor (2020).

Apartir disso foi seguido os procedimentos do diagrama já mencionado, como critério de segurança operacional e de processo, principalmente a colocação da junta de vedação e aperto em “X” dos parafusos da flange com a tampa de saída dos gases para o melhor assentamento da junta (Figura 32).

Figura 32 - Acoplamento da junta de vedação de papelão de alta temperatura

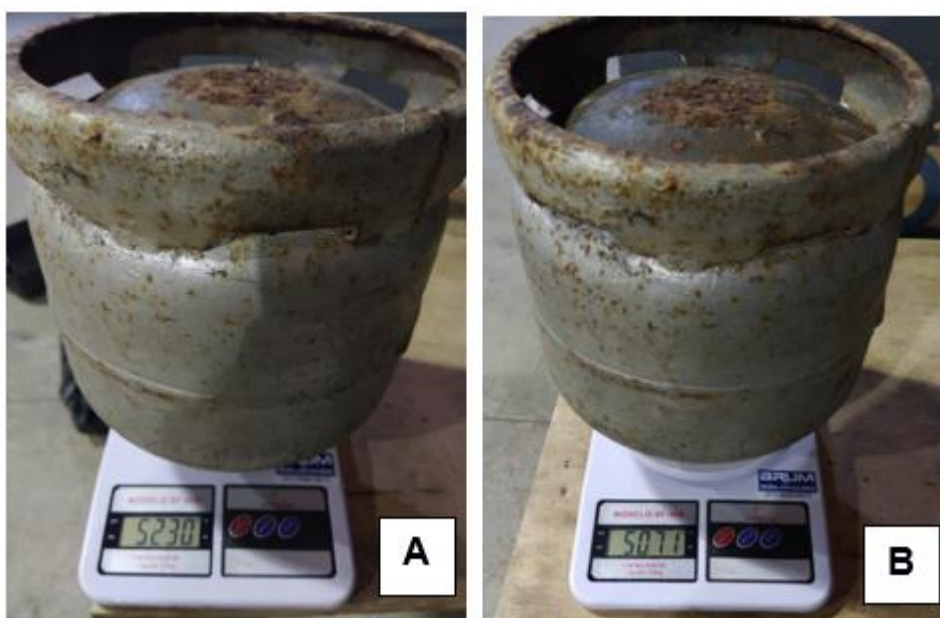


Fonte: Do autor (2020).

4.6.3 Coleta de dados sobre energia de injeção do sistema

Para iniciar o processamento do reator e fazer a posterior análise dos resíduos, fez-se necessário o controle da quantidade de energia injetada no sistema, para que a amostra entrasse no processo de degradação térmica. Conforme apresentado na Figura 33 A, antes de iniciar o processo de pirólise havia uma massa de 5.230 g (GLP + Casco do botijão); com tempo de residência do processamento de 1 h, passou-se a ter uma massa de 5.071 g (Figura 33 B).

Figura 33 - Coleta da massa antes e depois do processamento RSU. A) Massa do botijão antes do processo; B) Massa do botijão após o processo.



Fonte: Do autor (2020).

4.6.4 Processamento do RSU

Com todos os procedimentos analisados, e de acordo com diagrama apresentado anteriormente, realizou-se a coleta das informações prévias, e iniciou-se o processamento do resíduo sólido urbano – polímeros.

A coleta da temperatura (Figura 34) deu-se logo após o início do processo, e com 1 hora de residência do resíduo em processamento.

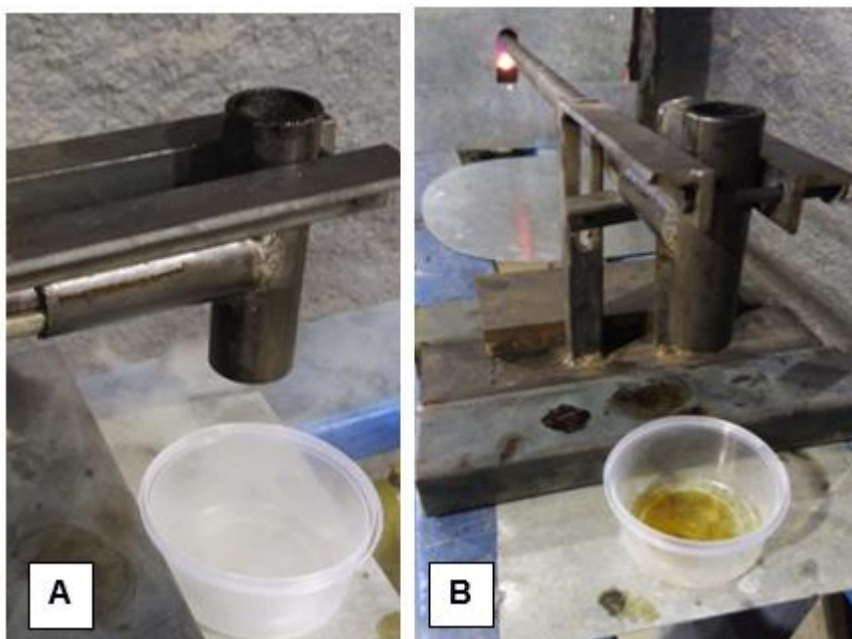
Figura 34 - Análise e coleta de temperatura



Fonte: Do autor (2020).

A análise e verificação de óleo e de gás ocorreu com tempo de 35 minutos de processamento, sendo observado pouco gás produzido pelo sistema (Figura 35 A); com 1 h de processamento, foi realizada nova verificação, marcando o fim do processo (Figura 35 B).

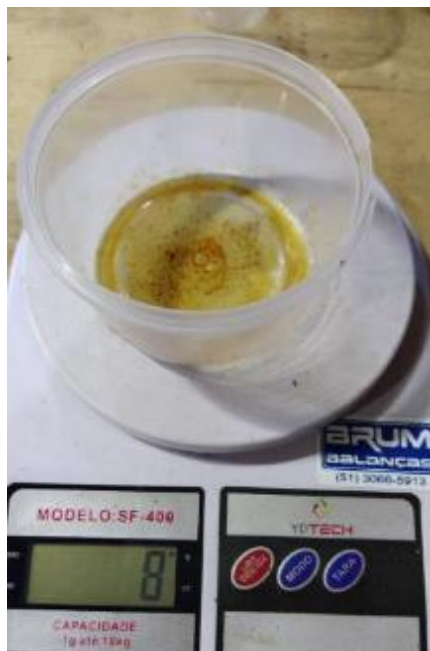
Figura 35 - Análise e verificação de óleo e gás. A) 35 minutos de processamento; B) 1 h de processamento.



Fonte: Do autor (2020).

Ao final do processo, a quantidade total de óleo gerado no processo, concentrado, é a apresentada na Figura 36.

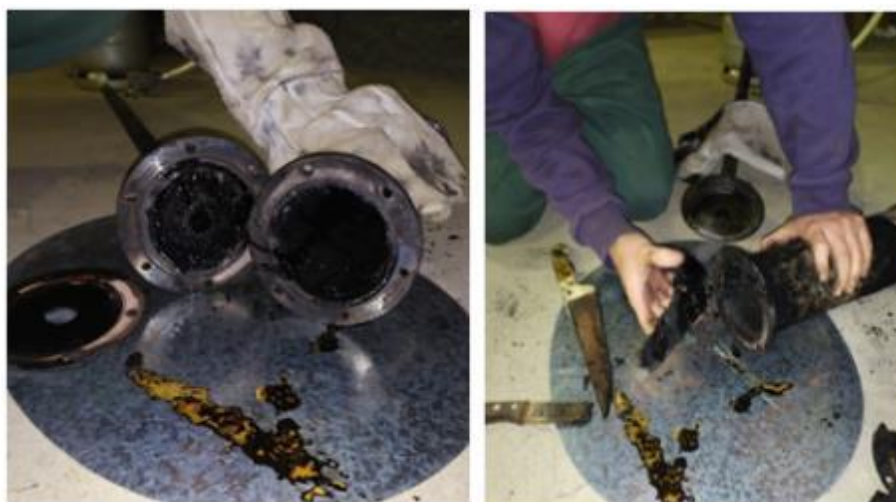
Figura 36 - Resultado de líquido (bio-óleo) - RSU



Fonte: Do autor (2020).

O procedimento para retirada e coleta do carvão – *biochar*, ocorreu após 1 h de processo do RSU, mais o tempo de resfriamento do leito, que foi aproximadamente 15 minutos (Figura 37).

Figura 37 - Coleta do carvão após processamento do RSU



Fonte: Do autor (2020).

Observou-se que ainda existia parte úmida no carvão e que se concentrou em um único volume de amostra, dificultando também a retirada do mesmo, que já era esperado. Também se identificou um odor bastante forte quando retirada a amostra do leito. Na Figura 38 está apresentado o resultado obtido a partir da amostra, após pirólise.

Figura 38 - Resultado de massa e volume do carvão (*biochar*) - RSU



Fonte: Do autor (2020).

4.7 Ensaio do processo de RSI – Couro *wet blue*

4.7.1 Coleta e separação do resíduo RSI – Couro *wet blue*

Para realização da análise do resíduo sólido industrial, obteve-se amostras de resíduo de couro *wet blue* (Figura 39) do curtume Couro Bom Retiro, do município de Roca Sales/RS. Coletaram-se peças fora do padrão para seguir o processo industrial, ou com alguma inconformidade, desde espessura, tamanho e umidade.

Figura 39 - Amostra de RSI - Couro *wet blue*



Fonte: Do autor (2020).

4.7.2 Procedimento para processo RSI – Couro *wet blue*

Com o resíduo separado e picado em peças menores, mediu-se seu volume e peso, conforme a Figura 40, tendo-se uma amostra de RSI a ser processada, com massa 499 g e volume 0,010m³.

Figura 40 - Amostragem RSI - Couro *wet blue* para processo



Fonte: Do autor (2020).

Inseriu-se, então, o RSI no leito de processamento, ocupando um volume aproximado ao ocupado anteriormente pelo polímero, porém, com peso consideravelmente maior (Figura 41).

Figura 41 - Armazenagem do RSI - Couro *wet blue* para processo



Fonte: Do autor (2020).

Obedecendo os procedimentos do diagrama já mencionado, como critério de segurança operacional e de processo, principalmente a colocação da junta de vedação e aperto em “X” dos parafusos da flange com a tampa de saída dos gases para o melhor assentamento da junta.

4.7.3 Coleta de dados sobre energia de injeção do sistema

Novamente, fez-se necessário controlar a quantidade de energia injetada no processo de pirólise. Para tal, efetuou-se a pesagem do botijão de gás, antes e depois do processo de degradação térmica do RSI.

Conforme apresentado na Figura 42, na imagem A tem-se a massa do botijão no início do processo, com 5.421g (GLP + Casco do botijão); após o tempo de residência do processamento de 1 h, tem-se a massa de 5.230 g, apresentado na imagem B.

Figura 42 - Coleta da massa antes e depois do processamento RSI. A) Massa do botijão antes do processo; B) Massa do botijão após o processo



Fonte: Do autor (2020).

4.7.4 Processamento do RSI - Couro *wet blue*

Com todas as etapas do processamento revisadas, conforme diagrama apresentado anteriormente, e todas as informações necessárias previamente coletadas, iniciou-se o processamento do resíduo sólido industrial – couro *wet blue*.

A coleta da temperatura foi realizada logo após o início do processo, e com 1 hora de residência do resíduo em processo (Figura 43).

Figura 43 - Análise e coleta de temperatura - Pirólise RSI



Fonte: Do autor (2020).

A verificação de óleo e gás, ilustrada na Figura 44, foi realizada com tempo de 17 minutos de processamento (Figura 44 A), onde também passou-se a perceber um odor bastante forte juntamente com os gases. O tempo total de residência do processo foi de 1 hora. Na Figura 44 B, está ilustrado o momento em que começou a formação de óleo no sistema, aos 24 minutos de processamento.

Figura 44 - Análise e verificação de óleo e gás



Fonte: Do autor (2020).

Ao final do processo, com a condensação dos gases obteve-se a formação de bio-óleo, chegando-se à quantidade de 36 g de líquido, a partir da massa de RSI processada, conforme demonstra a Figura 45.

Figura 45 - Quantidade resultante de bio-óleo - RSI



Fonte: Do autor (2020).

A etapa de retirada do carvão – *biochar*, deu-se após 1 hora de processo do RSI, mais o tempo de resfriamento do leito, que foi aproximadamente 15 minutos (Figura 46).

Figura 46 - Coleta do carvão após processamento do RSI – Couro *wet blue*



Fonte: Do autor (2020).

Observou-se que ainda existia parte úmida no carvão; no entanto, a formação de carvão, com granulometria mais uniforme, ocorreu de forma mais fácil (Figura 47).

Figura 47 - Resultado de massa e volume do carvão (*biochar*) - RSI



Fonte: Do autor (2020).

Verificou-se também a presença de odor bastante forte durante o processamento do RSI, desde a concentração dos gases até com a retirada do carvão do leito.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após longo estudo e desenvolvimento do protótipo, composto por: cilindro do leito rotativo, transmissão, tubulação de condensação dos gases e óleo, aquecimento do sistema e sobretudo processamento dos resíduos proposto, como RSU – polímeros e RSI – couro *wet blue*, este capítulo apresenta os resultados obtidos através da pesquisa.

Para caracterização dos resultados, considerou-se como padrão os parâmetros de tempo de residência de 1 hora e temperatura média de pirólise de 350 °C.

No processo da pirólise do resíduo sólido urbano, sendo ele a parcela polimérica, realizou-se a coleta das amostras de carvão (*biochar*), óleo (bio-óleo) e gás (*syngas*).

5.1 Caracterização do carvão (*biochar*)

A Tabela 5 apresenta a variação de massa dos resíduos, antes de processada e após, também com as características obtidas da variação do volume. Conforme esperado no estudo, ocorreu a perda de massa, e consequentemente de volume, em função do processo de degradação térmica.

Tabela 5 - Resultado da variação de massa e volume carvão (*biochar*)

Descrição	Resultado	
	RSU	RSI
Massa Antes (g)	149	500
Massa Após (g)	75	169
Perda de Massa (%)	49,67	66,2
Volume Antes (m ³)	0,011	0,010
Volume Após (m ³)	0,00033	0,00588
Perda de Volume (%)	96,93	41,2

Fonte: Do autor (2020).

Pode-se observar, a partir das massas e volumes coletados, que a umidade presente nos resíduos impacta nos resultados do processo, já que influencia a temperatura e o tempo de residência do resíduo. No entanto, como para o desenvolvimento desta pesquisa o tempo de permanência e a temperatura de processamento foram padronizadas, o teor de umidade presente nos resíduos ocasionou significativa variação nos volumes resultantes. Yilmaz et al. (2007) realizaram ensaios com couro wet blue em um reator de leito fixo, a partir do qual conclui que o aumento de temperatura gerou redução da parte sólida resultante do processo.

5.2 Caracterização do óleo (bio-óleo)

Sobre a condensação dos gases se obteve a formação de óleo (bio-óleo), no qual com o volume de massa processada de 149 g, se obteve 8 g de líquido, concluído uma conversão de 5,33 % em líquido do RSU, ao final do processo. Para o processamento do couro *wet blue* obteve-se o resultado de 7,2 % em fase líquida, tendo-se 36 g de líquido formado, para 500 g da massa total processada.

Para Basu (2010), a faixa de aquecimento do sistema favorece as reações, de modo que, com temperaturas mais altas, a produção de gases e óleo aumenta; assim sendo, decorrente das características dos produtos gerados neste processo experimental, é possível afirmar que a faixa de temperatura empregada, em torno de 350 °C, é baixa.

5.3 Caracterização do gás (*syngas*)

A realização dos resultados com a coleta do gás, através de bag, se deu insatisfatória e indeterminada pelos resultados encontrados no cromatógrafo, em função do sistema de saída dos gases não ter acoplado adequadamente ao protótipo, dificultando a coleta de gás. Tal falha foi concluída a partir dos resultados obtidos nas análises.

Na Tabela 6 são apresentadas as composições coletadas nos gases do processo da pirólise; observa-se porcentagens de O₂ e N₂ muito próximas aos valores do ar atmosférico. Os valores relacionados aos componentes analisados somam 91,7577 %, sendo que 8,2423 % são gases que o cromatograma não identificou.

Tabela 6 - Resultado da análise cromatográfica de gases

Elementos	Resultado	
	RSU	RSI
H ₂ (%)	0,8993	0,1177
CO ₂ (%)	12,1834	4,6254
O ₂ (%)	17,4078	19,0105
N ₂ (%)	61,0896	67,9723
CH ₄ (%)	0,0978	0,0318
Total (%)	91,6780	91,7577

Fonte: Do autor (2020).

Os relatórios das análises cromatográficas dos gases estão detalhados nos Anexos A e B.

5.4 Análise Elementar

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos através da análise elementar dos resíduos sólidos e líquidos, para que com as características obtidas se relacione o poder calorífico das amostras. O laudo da análise elementar, realizada em laboratório, está no Anexo C.

Tabela 7 - Resultado da análise elementar

Amostra	% C	% H	% N	% O
<i>Biochar</i> – RSU	70,63	7,78	4,20	17,39
Bio-óleo – RSU	20,70	9,81	6,75	62,74
<i>Biochar</i> – RSI	55,60	5,06	16,06	23,28
Bio-óleo – RSI	5,77	8,79	5,09	80,35

Fonte: Do autor (2020).

Para o cálculo do poder calorífico, utilizou-se a equação (5) apresentada anteriormente, e novamente abaixo, conforme Demirbas (1997). Os componentes de C, H, O e N são identificados pela análise elementar, que tem margem inferior a 2 % do valor teórico para o processo experimental. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8, a seguir.

$$PCS \left(\frac{MJ}{kg} \right) = 33,5 * C + 142,3 * H - 15,4 * O - 14,5 * N \quad (5)$$

Tabela 8 - Resultado poder calorífico superior

Amostra	PCS (MJ/KG)
<i>Biochar</i> – RSU	31,44
Bio-óleo – RSU	10,25
<i>Biochar</i> – RSI	19,91
Bio-óleo – RSI	1,32

Fonte: Do autor (2020).

5.5 Potencial energético

Para realizar o cálculo do rendimento do processo no reator, a fim de concluir sobre o potencial energético dos resíduos, a injeção de energia no sistema deve ser inferior à energia retirada, resultando em um sistema positivo. Para tais cálculos, empregou-se os valores de energia antes e após o processamento, considerando Barcelos (2011), que apresenta o poder calorífico do GLP, a 20 °C e 1 atm, na ordem de 11.200 kcal/kg.

A massa de GLP consumida no processamento do RSU foi de 159 g (Figura 33); e no processamento do RSI, foi consumida a massa de 191 g do gás (Figura 42). Convertendo tais grandezas de massa em quantidade de energia oriunda do GLP, verifica-se que foram consumidas as quantidades expostas na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultado poder calorífico superior multiplicado pela massa

Processo	Massa (g)	(kcal)
RSU	159	1780,8
RSI	191	2139,2

Fonte: Do autor (2020).

O resultado da energia obtida dos subprodutos da pirólise, podem ser verificados na Tabela 10, na qual os valores de poder calorífico foram multiplicados pelas massas obtidas no processo.

Tabela 10 - Resultado da conversão do poder calorífico em energia

Amostra	Poder Calorífico (MJ/kg)	Massa (kg)	Energia (MJ)
<i>Biochar</i> – RSU	31,49	0,075	2,358
Bio-óleo – RSU	10,25	0,008	0,082
<i>Biochar</i> – RSI	19,91	0,169	3,364
Bio-óleo - RSI	1,32	0,036	0,047

Fonte: Do autor (2020).

Confrontando os resultados exposto na Tabela 8 com o somatório do poder calorífico do RSU, obteve-se o valor de 41,69 MJ/kg, equivalente a 582,79 kcal, conforme Tabela 10, com valores já convertidos em energia; subtraindo-se deste valor a quantidade de energia injetada no processo (Tabela 9), observa-se uma perda energética de 1252,01 kcal.

Para o processo de RSI (Tabela 8), o valor total do poder calorífico obtido dos subprodutos foi de 21,23 MJ/kg, equivalente a 814,71 kcal, conforme Tabela 10, com valores já convertido em energia; da mesma forma, subtraindo-se a quantidade de energia injetada no processo, obteve-se uma perda energética de 1324,49 kcal.

De acordo com Conto (2016), a rotação do cilindro tem enorme significância para a análise estatística sobre as concentrações molares; com isso, abre-se mais uma hipótese de variável, que influencia no resultado final do experimento.

5.6 Reator de Pirólise

O desenvolvimento do protótipo de reator de pirólise contou com subconjuntos de componentes para o processo da pirólise em escala de bancada; observou-se sua insuficiência na coleta dos gases, conforme exposto na Tabela 6, da análise cromatográfica, na qual os resultados obtidos podem não condizer com a realidade; este é um ponto que pode ser melhorado, para que a análise dos gases seja identificada com mais precisão.

Também se observou falhas no sistema de aquecimento, com pontos de fixações e conexões que não garantiram plena vedação, sem vazamento; por este ser o principal meio de injeção de energia a processo, a presença de vazamentos compromete os resultados do estudo.

Para que se obtivesse um resultado satisfatório e confiável, com o profundo estudo elaborado, foram percebidas diversas variáveis envolvidas no processo, que se não precisamente controladas, influenciam na construção do equipamento, no processamento dos resíduos e, principalmente, nos resultados observados, como temperatura, tempo de residência e coleta dos subprodutos.

Uma oportunidade de melhoria identificada ao fim do experimento é a reutilização do gás gerado para aquecimento do sistema, aumentando, assim, o ganho energético do processo; contudo, a armazenagem e a vazão deste gás, direcionado para tal fim, deve ser considerada, de modo que seja efetivo.

6 CONCLUSÃO

Com base no estudo realizado, considerando as bibliografias consultadas durante o desenvolvimento do projeto, pode-se afirmar que para um processo, levando em consideração a tecnologia de reator de pirólise, pode haver muitas variáveis para que o resultado seja positivo, em relação ao ganho energético.

Os vários parâmetros envolvidos no processo influenciam drasticamente no resultado final, como por exemplo: a umidade da matéria a ser processada, granulometria, tempo de residência, temperatura e sua variação; tais variáveis são pontos que devem ser considerados para que o estudo apresente, por fim, os resultados que são esperados.

Ao fim da pesquisa, concluiu-se que o experimento e os resultados obtidos não atingiram resultados positivos quanto ao ganho energético dos subprodutos; quanto ao volume, no entanto, observou-se grande perda de massa decorrente da degradação térmica, o que torna válido pesquisar os tipos de gases que compõem os mais de 8 % de gases não identificados pelo cromatógrafo gasoso.

Sabendo-se que um dos motivos para o processo de pirólise em resíduo sólido urbano é o ganho energético, mas sobretudo a situação ambiental, temos a obrigação moral e legal da contribuição e melhorias de tecnologias, a fim de aprimorar o aproveitamento destes resíduos; por outro lado, a emissão de gases pode ser um dos entraves que essa tecnologia, o que pode inviabilizá-la.

Conclui-se também que o estudo da pirólise para o processamento destes tipos de combustíveis – RSI e RSU –, não se encontra maduro, uma vez que existe grande variedade de reatores e processos com o mesmo objetivo, mas ainda não há um processo e equipamento definido como ideal para este fim.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.004: Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004;

_____, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

ABRELPE **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/download-panorama-2017/>>. Acesso em: 26 set. 2019.

ALMEIDA, Marlon Brando Bezerra de. **Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gasóleo em craqueamento catalítico**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

ANP – **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>>. Acesso em: 20 out 2019.

AQUIM, Patrice. **Balanço de massa nos processos de ribeira e curtimento**. Porto Alegre: Tríplice Assessoria e Soluções Ambientais, 2008.

BARCELOS, Bernardo da Rocha **Análise da substituição de gás liquefeito de petróleo por gás natural em um condomínio residencial**. Porto Alegre, Universidade Federal do rio Grande do Sul, 2011.

BASU, P. **Biomass Gasification and Pyrolysis – Pratical Design**. Elsevier. Oxford, 2010.

BERNARDI, A. G. **Organic municipal solid waste (MSW) as feedstock for biodiesel production: A financial feasibility analysis**. Dissertação de Mestrado em Energia. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2014.

BIDONE, F. R. A. **Resíduos Sólidos Provenientes de Coletas Especiais: Eliminação e Valorização**. Porto Alegre: Editora ABES, 2001.

BOERRIGTER, H; RAUCH, R. **Handbook Biomass Gasification: Syngas production na utilization**. Netherlands, 2005.

BRASIL. Lei nº 12.350, de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 21 set. 2019.

_____, **Decreto nº 7404**, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm>. Acesso em: 21 out. 2019.

BRIDGWATER, A. V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical Engineering Journal**, v. 91, n. 2-3. p. 87-102, 2012.

_____, **Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and Bioenergy**. V. 38, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953411000638?via%3Dihub>>. Acesso em 22 set. 2019.

BROUST, F. **Overview of Fast Pyrolysis Principles, Processing and Applications**. In: Curso de Gaseificação da Biomassa. II Escola de Combustão, São José dos Campos, São Paulo; 2009.

CARDOSO, A. DE L. **Biorrefinaria, investigação de processos físico-químico, fermentativo e térmico para o aproveitamento de serragem de eucalipto**. Tese para Doutorado. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2009.

CARDOSO, A. Z.; ARRUDA, L. D. P.; SILVA, R. N. A. DA. **Desenvolvimento de ecoindicadores para uma planta de ciclohexano via simulação**. 2014. 149 f. Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil, 2014.

CHEMIN, Beatris F. **Manual da Univates para trabalhos acadêmicos**: planejamento, elaboração e apresentação. 3. ed. Lajeado: Univates, 2015.

CHEN, D; ZHENG Y; ZHU, X. **In-depth investigation on the pyrolysis kinetics of raw biomass**: Part I: Kinetic analysis for the drying and devolatilization stages. Bioresource Technology, v. 131. China, 2013.

CICB. **Centro das Industrias de Curtumes do Brasil**: Dados do setor. Disponível em: <<http://www.cicb.org.br/cicb/dados-do-setor>>. Acesso em 20 out 2019.

COBRASIL. **Curtume**: Nosso Processo, 2019. Disponível em <<http://www.cobrasil.com.br/pt/nosso-processo>>. Acesso em 19 out 2019.

CONTO, Daniela de. **Conversão termoquímica de capim-elefante em reator rotativo**. 2016. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade de Caxias do Sul – UCS, Caxias do Sul, 2016.

CONZ, Rafaela Feola. **Caracterização de matérias-primas e biochars para aplicação na agricultura**. Dissertação de Mestrado. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2015. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-13052015-142608/pt-br.php>>. Acesso em 21 out 2019.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. São Paulo: Editora Unicamp, 2008.

DALFOVO, Michael Samir; LANA, Rogério Adilson; SILVEIRA, Amélia. **Métodos quantitativos e qualitativos**: um resgate teórico. 2. ed. Blumenau: Revista Interdisciplinar Científica Aplicada, 2008.

DEMIRBAS, Fatih. **M. Biorefineries for biofuel upgrading: A critical review**. Applied Energy, v. 86, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261909001676?via%3Dihub>>. Acesso em 16 out. 2019.

DEMIRBAS, A. **Calculation of higher heating values of biomass fuels**. Fuel, v. 76, 1997. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261909001676?via%3Dihub>>. Acesso em 20 jun. 2020.

DOWNIE, A. **Pacific pyrolysis**. Disponível em: <<http://pacificpyrolysis.com/waste.html>> . Acesso em: 20 out 2019.

FELIPETTO, A. V. M. **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo aplicado a resíduos sólidos**: Conceito, planejamento e oportunidades. Rio de Janeiro: IBAM, 2007.

FEPAM. **Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais – Etapa Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2002.

FERREIRA, Nathalia de Lima. **Pirólise de Biomassa Lignocelulósica utilizando diferentes catalisadores para produção de bio-óleo**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

FOGLER, H. Scott. **Cálculo de Reatores**: o essencial da Engenharia das Reações Químicas. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

FONTES, Lúcio Ângelo Oliveira. **Desenvolvimento de uma unidade pirolítica com reator de cilindro rotativo**: obtenção de bio-óleo; Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.

FUSCALDO, Wladimir C. **Resíduos sólidos: práticas e conceitos**. Um estudo a partir da experiência de Londrina. São Paulo: Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade de São Paulo, 2001.

GONÇALVES, M. A; TANAKA, A. K; AMEDOMAR, A. de A. **A destinação final dos resíduos sólidos urbanos**: alternativas para a cidade de São Paulo através de casos de sucesso. Future Studies Research Journal. São Paulo, 2013. Disponível em: <www.spell.org.br/documentos/download/10663>. Acesso em: 19 out 2019.

GOUVEIA, N. **Resíduos sólidos urbanos**: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. Rio de Janeiro: Revista Ciência e saúde, vol. 17, 2012.

KIPPER, Eduardo. **Tratamento enzimático e produção de biogás por resíduos sólidos de curtume**. Dissertação para Mestrado em Engenharia Química. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

LE MOS, Patricia Fagas Iglecias. **Resíduos Sólidos e Responsabilidade Civil Pós-consumo**. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2011.

LIMA, L. M. Q. **Lixo: Tratamento e Biorremediação**. 3 ed. São Paulo: Hemus, 2004.

LIMA, Rosimeire S. **Resíduos sólidos domiciliares**: um programa de coleta seletiva com inclusão social. Brasília: Ministérios das Cidades, 2007.

MAIA, C. M. B. F. **Produção de biocarvão a partir de diferentes fontes de biomassa**. Aracaju: IX Encontro Brasileiro de Substâncias Húmicas, 2011.

MICHAELIS. **Moderno Dicionário da Língua Portuguesa**. Disponível em: <<https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/>>. Acesso em: 21 out 2019.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional 2019**. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico->

470/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf> Acesso em 17 out 2019.

MIRANDA, I .C. **Aproveitamento Energético a partir de resíduos de biomassa: bagaço e palha de cana-de-açúcar**. Dissertação de Mestrado - TPQB, 2009.

MONTEIRO, J. H. P.; et al. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2013.

MOREIRA, M. V.; TEIXEIRA, R. C. **Estado da arte tecnológico em processamento do couro**: revisão bibliográfica a nível internacional. Porto Alegre: Centro Nacional de Tecnologias Limpas, 2003.

NEIVA, Paula; LIMA, Roberta. **Oceano de plástico**. São Paulo: Revista VEJA, ano 41, n. 9, p. 92-97, mar. 2008.

OLIVEIRA, Diana Quintão Lima de. **Tratamento de rejeitos sólidos contendo cromo da indústria de couro**: uso em processos e adsorção e como fonte de nitrogênio na agricultura. Dissertação – mestrado em Agroquímica. Belo Horizonte: Universidade Federal de Lavras, 2007.

ONU. **Agenda 21**: Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. 3. ed. Brasília: Senado Federal, Subsecretaria de Edições Técnicas, 2001.

PACHECO, Jose Wagner Faria; FERRARI, Walter Alves. **Guia Técnico Ambiental de Curtumes**. Rev. Anual. 2º ed. São Paulo: CETESB, 2015.

PEDROZA, Marcelo Mendes; VIEIRA, Gláucia Eliza Gama; SOUSA, João Fernandes; PICKLER, Arilza de Castilho; LEAL, Edina Ruth; MILHOMEN, Cleide da Cruz. **Produção e tratamento de lodo de esgoto**: uma revisão. Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 11, n. 16, p. 89-188, 2010.

PEREIRA, L. L.; ZUBIOLO, C.; NASCIMENTO, J. S.; FREITAS, L. S.; RUZENE, D. S.; SILVA, D. P. Produção de *biochar* a partir da pirólise de resíduos agroindustriais. Sergipe: VIII Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe, 2016. Disponível em: <www.simprod.ufs.br>. Acesso em 21 out 2019.

PINTO, Mario da S. **A coleta e disposição de lixo no Brasil**. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 2009.

PRO-NATURA. **Conquistadors, cannibals and climate change**: A brief history of *biochar*. ProNatura International. Innovation Towards Sustainable Development. Disponível em: <<http://www.pronatura.org/>>. Acesso em 21 out 2019.

RINGER, M.; PUTSCHE, V.; SCAHILL, J. **Large-Scale Pyrolysis Oil Production: A Technology Assessment and Economic Analysis Technical Report**, 2006.

RIO GRANDE DO SUL. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul – PERS/RS**. Porto Alegre, 2014.

ROBERTS, George W. **Reações Químicas e Reatores Químicos**. Rio de Janeiro, LTC, 2010.

RODRIGUES, V.; COSENZA, C. A. N.; BARROS, C. F.; KRYKHTINE, F.; FORTES, L. E. N. S. **Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos e Produção de Energia**: Análise de Legislação para Viabilidade Econômica de Soluções Conjuntas. XI Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. Rezende, 2014.

ROSA, A. **Fabricação de cada computador consome 1.800 quilos de materiais**. 2007. Disponível em: <<https://www.cidadaoeco.com.br/blog/fabricacao-de-cada-computador-consome-1-800-quilos-de-materiais>>. Acesso em: 20 out 2019.

SANTOS, C. E. **Potencial de desenvolvimento de bio combustível produzido a partir de bio-óleo da pirólise de papel moeda descartado**. Dissertação em mestrado da Engenharia Civil. São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2014.

SANTOS, K. G. **Aspectos fundamentais da pirólise de biomassa em leito de jorro:** fluidodinâmica e cinética do processo. Tese de Doutorado em Engenharia Química). Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

SCHALCH, V. **Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos.** São Paulo: Notas de aula, 2012.

SHARMA, V K; CANDITELLI, M. FORTUNA, F. CORNACCHIA, G. **Processing of urban and agro-industrial residues by aerobic composting: Review.** Energy Conversion and Management, 1997. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890496000684>>. Acesso em 26 set. 2019.

SILVA, R. V. S DA. **Pirólise da torta da como uma opção de destino para este resíduo.** 2014. Universidade Federal Fluminense, 2014.

SILVEIRA, Paula Daolio. **Avaliação do Potencial da Pirólise de Resíduos Sólidos Urbanos como Processamento Termoquímico para Recuperação de Matéria e Energia.** Londrina: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

TOMAZ, Edson. **Modelagem matemática e simulação de incinerador de resíduos perigosos de forno rotativo com pós-combusto em estado estacionário e não estacionário.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, 1998.

VAIANO, Bruno. **A grande ilha de lixo no Pacífico não é o que você imagina.** Revista Super Interessante, 2018. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/ciencia/the-great-pacific-garbage-patch-isnt-what-you-think-it-is/>>, Acesso em 16 out. 2019.

WALDMAN, Maurício. **Lixo:** cenários e desafios, abordagens básicas para entender os resíduos sólidos. São Paulo: Cortez, 2010.

WILLIAMS, P. T. **Waste Treatment and Disposal**. Second Ed. UK: John Wiley e Sons Ltd, 2005.

YILMAZ, O. K, CEM, K., MITHAT, Y., MEHMET, S., JALE, Y., **Conversion of leather wastes to useful products. Resources, Conservation and Recycling**, 2007. 12f. Issue. 2007.

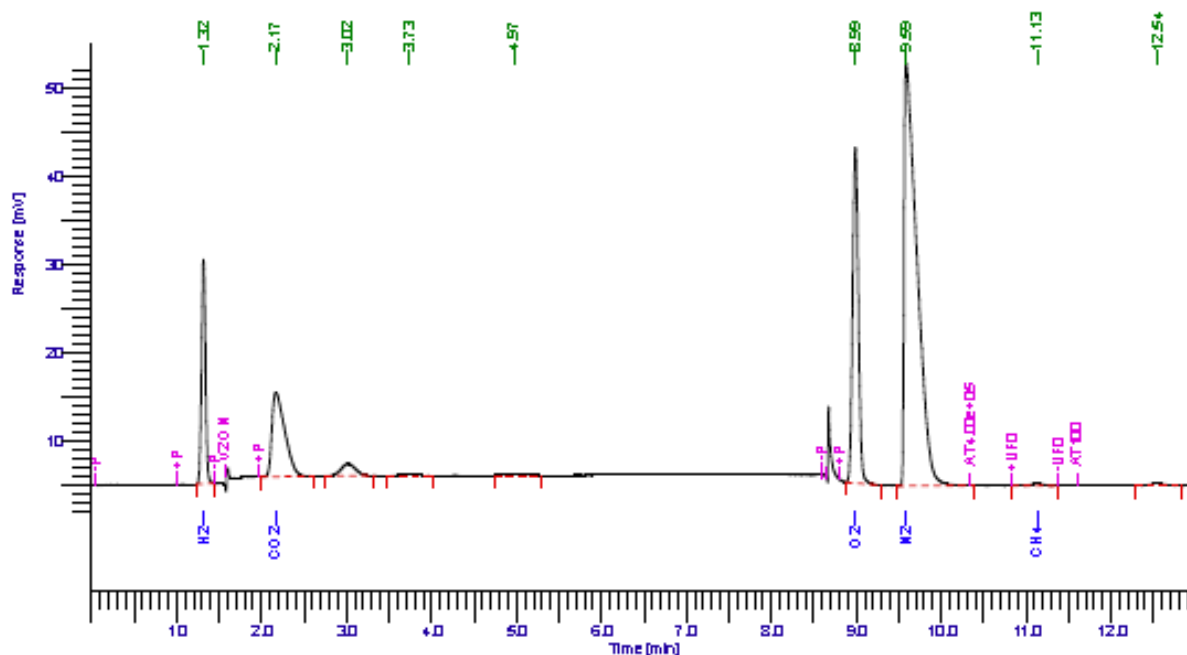
ANEXOS

ANEXO A – Análise Cromatográfica de Gases do RSU

Software Version : 6.3.2.0646
 Sample Name :
 Instrument Name : Clarus580
 Rack/Vial : 0/0
 Sample Amount : 1.000000
 Cycle : 1

Date : 6/18/2020 1:25:27 PM
 Data Acquisition Time : 6/18/2020 11:16:43 AM
 Channel : A
 Operator : manager
 Dilution Factor : 1.000000

Result File : E:\Dados_TCW\S\Resultados\18062020_FelipeRSU01.Ans
 Sequence File : E:\Dados_TCW\S\Sequências\18062020_FelipeRSU01.seq



ANALISE CROMATOGRÁFICA DE GASES

Peak #	Component Name	Time [min]	Area [μV·sec]	Height [μV]	Area [%]	BL	Adjusted Amount
1	H2	1.316	82398.45	25394.01	9.50	*BB	0.8993
2	CO2	2.168	100551.69	9553.62	11.59	BB	12.1834
6	O2	8.989	179974.95	38062.07	20.75	BB	17.4078
7	N2	9.587	501717.96	48042.99	57.85	*BB	61.0896
8	CH4	11.125	2601.76	234.49	0.30	*MM	0.0978
			867244.81	121287.18	100.00		91.6780

Missing Component Report

Component Expected Retention (Calibration File)

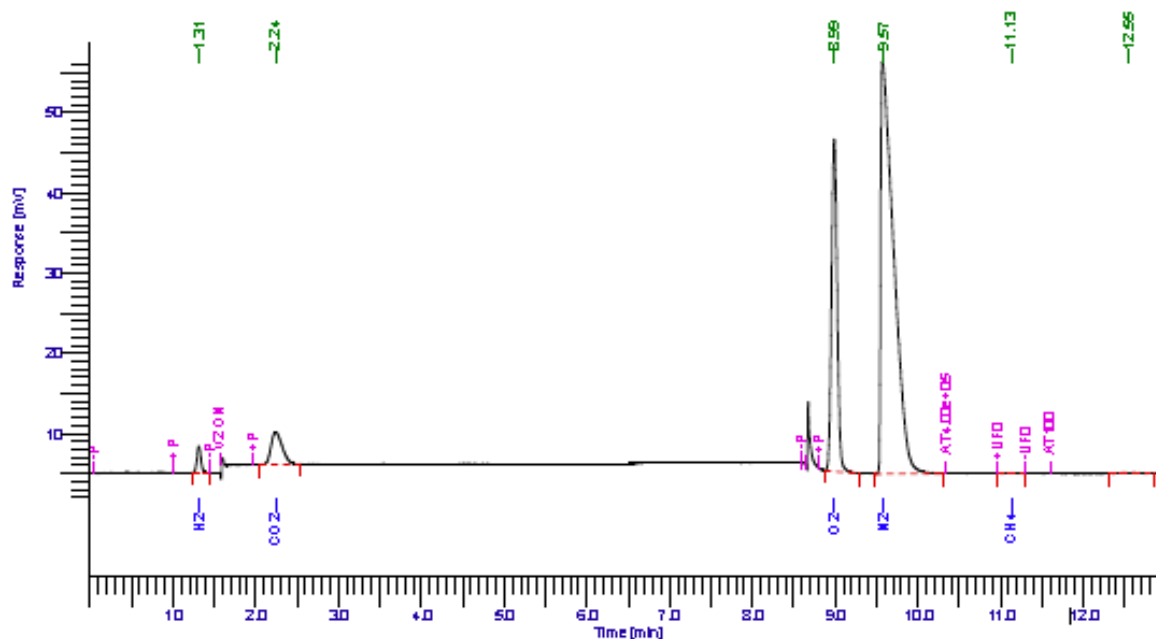
H2S 7.570

ANEXO B – Análise Cromatográfica de Gases do RSI

Software Version : 6.3.2.0646
 Sample Name :
 Instrument Name : Clarus580
 Rack/Vial : 0/0
 Sample Amount : 1.000000
 Cycle : 1

Date : 6/18/2020 1:22:14 PM
 Data Acquisition Time : 6/18/2020 12:05:21 PM
 Channel : A
 Operator : manager
 Dilution Factor : 1.000000

Result File : E:\Dados_TC\WS\Resultados\18062020_FelipeC201A.rst
 Sequence File : E:\Dados_TC\WS\Sequencias\18062020_FelipeC201.seq



ANALISE CROMATOGRÁFICA DE GASES

Peak #	Component Name	Time [min]	Area [μV²sec]	Height [μV]	Area [%]	BL	Adjusted Amount
1	H2	1.313	10780.87	3252.62	1.34	*BB	0.1177
2	CO2	2.240	38173.78	4059.06	4.74	BB	4.6254
3	O2	8.989	196544.55	41525.05	24.43	BB	19.0105
4	N2	9.574	558244.24	51519.71	69.38	BB	67.9723
5	CH4	11.131	846.45	80.66	0.11	*MM	0.0318
			804689.90	100437.09	100.00		91.7577

Missing Component Report

Component Expected Retention (Calibration File)

H2S 8.160

ANEXO C – Laudo de Análise Elementar – RSU e RSI



Central Analítica - Instituto de Química
Laboratório de Análise Elementar
Porto Alegre, RS – Brasil
CEP: 91530-190
Telefone/fax: (51)3308-9606

Porto Alegre-RS, 18/06/2020 17:54

Analisado por: Dra. Larissa R. Rodrigues

AMOSTRA:	%C	%H	%N
RSU sólida	70,63	7,78	4,2
RSU líquida	20,7	9,81	6,75
WET sólida	55,6	5,06	16,06
WET líquida	5,77	8,79	5,09